

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta

Lauri Uotinen

**KALLIOTUNNELIEN RATARAKENTEIDEN
TÄRINÄVAIMENNUKSEN MITOITUKSEN JA
SUUNNITTELUN PERUSTEET**

Diplomityö on jätetty tarkistettavaksi Espoossa 26.11.2008.

Työn valvoja

Prof. Jukka Aalto

Työn ohjaaja

DI Jarmo Roinisto

TKK
Rakennus- ja
ympäristötekniikan kirjasto

Tekijä:	Lauri Uotinen		
Diplomityö:	Kalliotunnelien ratarakenteiden värinänvaimennuksen mitoituksen ja suunnittelun perusteet		
Päivämäärä:	26.11.2008	Sivumäärä:	156
Professuuri:	Rakenteiden mekaniikka	Koodi:	2112
Valvoja:	Prof. Jukka Aalto		
Ohjaaja:	DI Jarmo Roinisto		
Avainsanat:	värinä, värähtely, runkoääni, eteneminen, vaimentuminen, vaimennusmatto, ratapalkin alusmatto, kalliotunneli, ratarakenne, metro, juna		

Työssä esitetään värinänvaimennuksen suunnittelun ja mitoituksen lähtökohdiksi sekä työkaluiksi värinän eteneminen ja vaimeneminen, kirjallisuustutkimus kansainvälisistä raja-arvoista, stokastisesti perusteltu suositus raja-arvoista sekä mallintamisen lähtökohdat ja perusteet. Tavoitteena oli selvittää ratarakenteiden värinänvaimennuksen suunnitteluprosessin vaatimat lähtötiedot ja esittää optimaalinen suunnitteluratkaisu. Tuloksena syntyneen materiaalin avulla voidaan määrittää värinänvaimennusrakenteelle vaadittu vaimennuskyky (syöttöhäviö) ja mallintamalla suunnitella rakenne, jolla se saavutetaan. Kaavoituksessa tai alustavassa suunnittelussa, kun käytössä on vähemmän lähtötietoja, voidaan käyttää työssä esitettyjä materiaaliominaisuustaulukoita sekä värinän etenemisen teoreettista mallia, jolloin saadaan suuruusluokka-arvio odotettavissa olevasta värinä- ja/tai runkomelutasosta.

Työssä on tutkittu myös pyörähdyssymmetrisen (aksisymmetrisen) FEM-mallin, diskretoidun yksiulotteisen etenemismallin ja teoreettisen etenemismallin tarkkuutta verrattuna todellisiin mittaustuloksiin, joita saatiin Kampin metroaseman itäpuolella suoritetuista värinämittauksista. Ratarakenteen osien yksityiskohtaista mallintamista varten on luotu katsaus erilaisiin osarakennemalleihin sekä niiden vahvuuksiin ja heikkouksiin. Näiden rakennemallien ja valmistajan ilmoittamien materiaaliominaisuuksien avulla on mahdollista analysoida paras mahdollinen vaimennusratkaisu kutakin ratarakennetyyppiä ja häiriölähdettä varten. Menetelmä soveltuu myös raitiovaunuliikennettä ja rautatieliikennettä varten, kun raideajoneuvon aiheuttama häärä tunnetaan.

Fakulteten för ingenjörsvetenskaper och arkitektur			
Författare:	Lauri Uotinen		
Diplomarbete:	Planeringsprinciper för vibrationsdämpning på bankonstruktioner i bergtunnlarna		
Datum:	26.11.2008	Antal sidor:	156
Professur:	Struktural mekanik	Kod:	2112
Övervakare:	Prof. Jukka Aalto		
Handledare:	Dipl.ing. Jarmo Roinisto		
Nyckelord:	vibration, strukturbundna buller, vågutbredning, dämpning, dämpningsmatta, underlägg för syllar, bergtunnel, välskonstruktion, metro, tåg		
<p>Diplomarbetet presenterar preliminär planering för vågutbredning och dämpning av vibrationer, litteraturundersökning av internationella gränsvärden, statistisk diskussion om rekommendation för gränsvärden samt grunder för analytisk modellering. Målet för arbetet var att finna det lämpligaste ursprungsdata för planering och presentera den optimala planeringslösningen för vibrationsdämpning. Dämpningskrav (Insertion Loss) kan beräknas med de erhållna materialen och via matematisk modellering. I planläggning och i preliminär planering, när färre mängd ursprungsdata är tillgängligt, är det möjligt att använda materialens tabellerade vibrationsegenskaper för att erhålla en ungerfärlig analys på den förväntade vibrationen och det strukturbundna bullret.</p> <p>Exaktheten på en axisymmetrisk FEM-model, en diskretiserad endimensionell vågutbredningsmodell, och den teoretiska vågutbredningsmodellen jämfördes med uppmätt data från öster om Kamppens metrostation. För en detaljerad planering av vibrationsdämpning i strukturer gjordes en översikt av delmodellerna och deras hållbarhet och svagheter. Med dessa delmodeller och med tillverkarnas angivna materialegenskaper är det möjligt att erhålla den bästa möjliga dämpningslösningen för samtliga bantyper och vibrationskällor. Metoden kan också tillämpas för spårvagns- och järnvägstrafik, förutsatt att fordonets exciteringskraft.</p>			

Faculty of Engineering and Architecture			
Author:	Lauri Uotinen		
Thesis:	Design Principles of Vibration Dampeners in Rail Structures within Rock Tunnels		
Date:	November 26 th 2008	Number of pages:	156
Professorship:	Structural Mechanics	Code:	2112
Supervisor:	Jukka Aalto, Prof.		
Instructor:	Jarmo Roinisto, M.Sc. (Tech.)		
Keywords:	tremor, vibration, structure borne noise, propagation, damping, ballast mat, under sleeper pad, rock tunnel, rail structure, metro, train		
<p>This thesis presents initial design data for the design of vibration damping, the propagation and damping of vibration. It also provides a literature study on international limit values together with a recommendation on limit values based on stochastic analysis. In addition, the thesis introduces the basics of modeling. For this purpose, the goal of the thesis was to chart the necessary initial data for the design process of vibration damping and to present an optimal design solution. Using the material thus produced, it is possible to calculate the damping requirement (Insertion Loss) for the vibration damping material and to design a suitable damping structure via mathematical modeling. If there is a restricted amount of initial data available, the given material data sheets and the model for theoretical vibration propagation may be used for urban planning and in preliminary design. Through this, an approximation of the expected vibration and structure borne sound noise levels may be obtained.</p> <p>This thesis compares the accuracy of three different models to actual measurement data obtained from the East side of Kamppi Metro Station. The models used for this study are: an axisymmetric FEM model, a discretized one-dimensional propagation model and a theoretical propagation model. For a detailed design of vibration damping structures in the track structure, a survey on available submodels and their strengths and weaknesses was made. With these submodels and with the material specific parameters obtained from the manufacturer, it is possible to analyze the best possible damping solution for a given track and vibration source type. This method can also be applied to other track-based vehicles (e.g. tram and train), when the exciting force of the vehicle is known.</p>			

ESIPUHE

Tämä työ tehtiin Kalliosuunnittelu Oy Rockplan LTD:n toimeksiannosta 19.5.2008 – 26.11.2008. Työn tekemisen taustalla on Kalliosuunnittelu Oy:n sekä Kalliotekniikka Consulting Engineers Oy:n välinen yhteistyö ja kiinnostus laajentaa värähtelyilmiöihin liittyvää suunnittelu- sekä mittausosaamista. Erityisesti huomiota haluttiin kiinnittää kallio-
tunneleihin liittyviin värähtelyilmiöihin (tärinään ja runkomeluun).

Työn ohjausryhmässä toimivat:

Prof. Jukka Aalto	Teknillinen korkeakoulu	työn valvoja
DI Jarmo Roinisto	Kalliosuunnittelu Oy	työn ohjaaja
RI Mikko Piitulainen	Kalliosuunnittelu Oy	
DI Guido Nuijten	Kalliosuunnittelu Oy	
DI Pertti Paavola	Kalliotekniikka Oy	
DI Juha Tuovinen	Kalliotekniikka Oy	

Kuvat 32 ja 33 on julkaistu Blom Oy:n luvalla (julkaisuluvan myöntäjä oli Paavo Uuttu 18.11.2008). Kuvien käyttämisen ja jäljentämiseen tarvitaan Blom Kartta Oy:n kirjallinen lupa. Kuvat ovat Blom Oy:n omaisuutta (© Blom).

KIITOKSET

Kiitän kaikkia ohjausryhmän jäseniä lämpimästi saamistani neuvoista ja resursseista!

Erityiskiitoksen haluan osoittaa Juha Tuoviselle, joka uhraten omia resurssejaan on tukenut työhön liittyvien mittausten toteuttamisessa sekä vastannut mittausteknistä osaamista vaati-
viin erikoiskysymyksiini.

Kiitän työn ohjaajaa Jarmo Roinistoa sekä Pertti Paavolaa työn tavoitteiden selkeästä mää-
rittelystä ja niistä kiinnipitämisestä sekä tutkimuksen rahoittamisesta. Mikko Piitulainen on
hoitanut ansiokkaasti työn ohjausryhmän koordinoinnin ja mahdollistanut työn suorittami-
sen aikataulussa. Professori Jukka Aalto on määritellyt työn tieteellisen vaatimustason sekä
pitänyt huolta siitä, että työ on korkealaatuinen.

Kollegoitani DI Topias Sireniä sekä FM Gustav Westerlundia tahdon kiittää työn oikolu-
kemisesta ja kielentarkastuksesta.

Kiitän myös kaikkia muita, jotka osaltanne tuitte ja edistitte työn tekemistä. Viranomaisia ja
muita suunnittelutahoja haluan kiittää saamistani tiedoista ja vastauksista.

Kiitän vanhempiani, Kalle Uotista sekä Riitta Tikkusta, sekä veljeäni, Miikka Uotista, kai-
kista diplomityön tekemisen mahdollistaneista järjestelyistä.

Suuren kiitoksen osoitan myös kihlatulleni, Sini Leppäkoskelle,
saamistani ymmärryksestä sekä kannustuksesta.

Pasilassa 26.11.2008,



Lauri Uotinen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
SAMMANFATTNING	4
ABSTRACT	5
ESIPUHE.....	6
KIITOKSET	7
SISÄLLYSLUETTELO	9
SYMBOLILUETTELO.....	12
LYHENNELUETTELO.....	15
MÄÄRITELMÄT.....	16
1 JOHDANTO.....	18
2 AIEMMAT TUTKIMUKSET.....	19
3 TUTKIMUSAINEISTO.....	20
4 TUTKIMUSMENETELMÄT	21
5 KESKEISET KÄSITTEET	22
5.1 Lähtötietotaso	22
5.2 Desibeliasteikko	22
5.3 Taajuuskaistat	23
5.4 Painotusfunktiot.....	24
5.5 Tehollisarvo (RMS).....	25
6 VÄRÄHTELYILMIÖ	26
6.1 Erilaiset värähtelyliikkeet.....	26
6.2 Värähtelyn vaimeneminen.....	28
6.3 Värähtelyn eteneminen kallioperässä	32
6.4 Värähtelyn vaimeneminen kallioperässä	33
6.5 Värähtelyn eteneminen maaperässä	34
6.6 Värähtelyn vaimeneminen maaperässä	35
6.7 Ongelman erityispiirteitä	35
7 MAANALAISET VÄRÄHTELYLÄHTEET.....	37
7.1 Ajoneuvoliikenne	37
7.2 Raideliikenne	37
7.3 Räjähdykset	38
8 VAATIMUSTASO.....	38
8.1 Lakiin perustuvat vaatimukset.....	38
8.2 Taloudellisuusvaatimukset	39
8.3 Toteutettavuusvaatimukset	40
9 MITOITUSKÄYTÄNTÖ.....	41
9.1 Mitoittamisen yleiset periaatteet.....	41
9.2 Mitoittamisen nykytilanne.....	42

10	MALLINTAMINEN	51
10.1	Yleistä.....	51
10.2	Mitoitusohjelmat	51
10.3	Kuormien mallintaminen.....	52
10.4	Geometrisen vaimentumisen mallintaminen	54
10.5	Materiaalivaimentumisen mallintaminen	55
10.6	Rakovaimentumisen mallintaminen	56
10.7	Täysempiirinen runkomelun etenemismalli	56
10.8	Yksiaksiaalinen etenemismalli	59
10.9	Mallintaminen elementtimenetelmällä	62
10.10	Lattioiden ja seinien ominaistajuusanalyysi	65
10.11	Koinsidenssianalyysi	67
11	SUUNNITTELUN LÄHTÖTIEDOT	68
11.1	Olosuhteet.....	68
11.2	Ympäristötekijät	69
11.3	Rajat ja rajausta	70
12	TÄRINÄNVAIMENNUSRAKENTEEN SUUNNITTELU	70
12.1	Mallintaminen	70
12.2	Mitoittaminen	77
12.3	Optimointi	78
12.4	Rakenneratkaisut	79
13	KENTTÄMITTAUKSET	81
13.1	Tutkimusolehdut	81
13.2	Mittauslaitteisto	82
13.3	Esiselvitykset	84
13.4	Mittausjärjestely Kampissa	85
13.5	Esiselvitys Puotilantie 8:ssa	87
13.6	Mittaukset Juorumäenkuja 1:ssa.....	88
13.7	Esiselvitys Asemamiehenkuja 2:ssa	90
14	TUTKIMUSTULOKSET.....	91
14.1	Yleistä.....	91
14.2	Alustavat runkomelumittaukset.....	92
14.3	Mittaukset Kampissa	92
14.4	Esiselvitys Puotilantie 8:ssa	100
14.5	Mittaukset Juorumäenkuja 1:ssa.....	101
14.6	Esiselvitys Asemamiehenkuja 2:ssa	102
14.7	Yksilotteinen malli	103
14.8	Aksisymmetrinen malli (Abaqus)	105
14.9	Tutkimusongelmat.....	109

15	LUOTETTAVUUSANALYYSI.....	111
15.1	Värähtelymittausten luotettavuus	111
15.2	Numeerinen stabiilius	112
15.3	Stokastinen luotettavuus	113
16	JOHTOPÄÄTÖKSET	116
17	SUOSITUKSET	118
17.1	Yleistä.....	118
17.2	Raja-arvot	120
17.3	Kaavoitus ja ympäristövaikutusten arviointi	122
17.4	Alustava mitoitus	123
17.5	Rakennesuunnittelu	124
18	YHTEENVETO	125
	LÄHDELUETTELO	127
	LIITTEET	136
	LIITE A – Yleisimmät taajuuskaistat	137
	LIITE B1 – Taajuuspainotukset	138
	LIITE B2 – Taajuuspainotukset-kuvaaja.....	139
	LIITE C – Geometrinen vaimennus	140
	LIITE D – Abaqus-mallin solmunumerointi	141
	LIITE E – Kaavakokoelma.....	142
	LIITE F – Vaimenemisen mittaustulokset (Kamppi).....	144
	LIITE G – Yksiulotteisen mallin johto ja perusteet	145
	LIITE H – 1D-tärinän eteneminen muunnospisteeseen	152

SYMBOLILUETTELO

a	kiihtyvyys	$L_{Aeq,1h}$	A-painotettu äänen ekvivalenttitaso tunnin tarkastelujaksolla
a	laatan pituus suuntaan a	L_e	elementin pituus (elementtiväli)
a_1	kiihtyvyys pisteessä yksi	L_I	intensiteettitaso
a_2	kiihtyvyys pisteessä kaksi	L_p	äänenpainetaso
a_{rms}	kiihtyvyyden RMS-painotettu arvo	$L_{pA,LF}$	A-painotettu äänen ekvivalenttitaso
a_w	kiihtyvyyden painotettu maksimiarvo	L_{pG}	G-painotettu äänen ekvivalenttitaso
$a_w(\zeta)$	kiihtyvyyden painotettu hetkellinen arvo	L_v	nopeustaso (yleensä RMS)
$a_{w,95}$	kiihtyvyyden painotettu maksimiarvo 95 % luottamustasolla	L_W	äänitehotaso
A	huoneen absorptioala	L_x	laatan pituus x-suunnassa
A	A-painotus äänenpaineelle	L_y	laatan pituus y-suunnassa
A_0	lyhytaikaisen värähtelyn enimmäisarvon ehdoton kriteeri	M	kokoonpuristuvuusmoduuli
A_1	lyhytaikaisen värähtelyn enimmäisarvon välitön kriteeri	m	massa
A_2	lyhytaikaisen värähtelyn enimmäisarvon ehdoton kriteeri	m	amplitudien suhteen eksponentti
A_3	jatkuvan värähtelyn enimmäisarvon kriteeri	m	ominaismuodon indeksi
A_r	jatkuvan värähtelyn enimmäisarvon kriteeri	m_{tot}	rakenteen kokonaismassa
A_u	lyhytaikaisen värähtelyn enimmäisarvo välitön kriteeri	n	amplitudien suhteen eksponentti
b	laatan pituus suuntaan b tai heikomman suunnan pituus	n	lukumäärä, otoksen koko
c	vaimennusvakio	n	ominaismuodon indeksi
c	äänen etenemisnopeus ilmassa	O_n	oktaavikaista numerolla n
c_d	aallon nopeus materiaalissa	P	paine
c_{eff}	efektiivinen vaimennusvakio	P	teho

c_s	leikkausaallon nopeus	Q	Q-tekijä (vahvennuskerroin resonanssissa)
D	taivutusjäykkyys	r	etäisyys lähteestä havaitsijaan
E	kimmomoduuli	r	kulmanopeuksien suhde
E_{app}	arvioitu kimmomoduuli	r_0	vertailuetäisyys
f	taajuus	r_1	etäisyys pisteeseen yksi
f_c	koinssidenssitaajuus	r_2	etäisyys pisteeseen kaksi
f_{max}	suurin tarkasteltava taajuus	r_{vert}	pystysuuntainen etäisyys
f_{mn}	laatan (m, n) ominaismuoto	S	säteilevän alueen pinta-ala
f_n	ominaistaajuus	t	aika
$f_{n,max}$	ominaistaajuuden enimmäisarvo	T	jaksonaika
f_s	rakenteen ominaistaajuus	T	lämpötila
F	herätevoima	T_n	terssikaista numerolla n
F_a	kytkentäkerroin rakenteen ja maan välillä	u	aaltoliikkeen amplitudi
F_e	tärinän vahvistuskerroin lattialle	u_1	amplitudi pisteessä yksi
F_s	radan kunnon kerroin	u_2	amplitudi pisteessä kaksi
g	putoamiskiihtyvyys (9,80665 m/s ²)	v	nopeus
G	leikkausmoduuli	v_0	vertailunopeus
G	junan nopeus	v_a	äänen nopeus ilmassa
G_0	junan referenssinopeus	v_P	P-aallon nopeus
h	junan nopeuden ja vertailunopeuden suhteen eksponentti	v_{PV}	nopeuden huippuarvo (PV)
h	laatan paksuus	v_R	Rayleigh-aallon nopeus
H	maakerroksen korkeus	v_{rms}	nopeuden RMS-painotettu arvo
I	intensiteetti	v_S	S-aallon nopeus

I	jäyhyysmomentti	v_w	nopeuden painotettu maksimi-arvo
I_E	energiaintensiteetti	$v_{w,95}$	nopeuden painotettu maksimi-arvo 95 % luottamustasolla
KB_F	tärinän dimensioton tunnusluku	V_{\max}	värähtelyn lyhytaikainen vertailuarvo
k	jousivakio	V_{per}	jatkuvan värähtelyn vertailuarvo
k_i	rakenneosan i jousivakio	w	laatan taipuma
k_{dyn}	dynaaminen jousivakio	\hat{w}_{mn}	laatan taipuman yrite
k_{eff}	efektiivinen jousivakio	x	siirtymä (x)
l	laatan pituus jäykempään suuntaan	\dot{x}	nopeus (v)
L_a	kiihtyvyytaso (yleensä RMS)	\ddot{x}	kiihtyvyys (a)
L_{aw}	painotettu kiihtyvyytaso	X	amplitudi
L_{Aeq}	A-painotettu äänen ekvivalenttitaso		
α	vaimennusvakio	η_p	kerroin P-aallonnopeuden virheelle
α	kulma	θ	RMS-integraatioaika F = 0,125 s, S = 1,0 s ja L = 8,0
γ	leikkausmuodonmuutos	λ	aallonpituus
γ	vaimennusvakio	λ_p	P-aallon pituus
γ_v	ennusteen varmuuskerroin	λ_s	S-aallon pituus
$\gamma_{v,LOW}$	ennusteen varmuuskerroin (alhainen varmuustaso)	μ	vahvennuskerroin
Δ	suhteellinen virhe	ν	Poissonin luku, suppeumaluku
Δt	aika-askeleen pituus	ρ	tiheys
Δx	elementin pituus	σ	säteilyteho
Δx_p	elementin pituus (P-aallolle)	σ	runkomelun siirtokerroin
Δx_s	elementin pituus (S-aallolle)	τ	leikkausjännitys
ζ	vaimennussuhde	ω	kulmanopeus

η_M kerroin mittausepävarmuudelle
 $\eta_{M,D}$ kerroin mittalaitteen mittausepävarmuudelle

ω_{\max} suurin tarkasteltava ominaiskulmanopeus
 ω_n ominaiskulmanopeus

LYHENNELUETTELO

ANSI	American National Standards Institute (USA)	PV	Peak Value eli huippuarvo
BEM	Boundary Element Method	PPV	Peak to Peak Value eli huippuarvojen erotus
CEN	Comité Européen de Normalisation	RATO	Ratatekniset ohjeet
DEFRA	Department for Environment, Food and Rural Affairs (Iso-Britannia)	RHK	Ratahallintokeskus
DIN	Deutsches Institut für Normung (Saksa)	RIL	Rakennusinsinöörien liitto
EN	Europäische Norm	RMS	Root Mean Square eli värähtelyn tehollisarvo
FEM	Finite Element Method	NS	Norwegian Standard (Norja)
FFT	Fast Fourier Transform, algoritmi 2-kantaiselle näytetaajuudelle	SN	Schweitzer Norm (Sveitsi)
FTA	Federal Transit Administration (USA)	SS	Svensk Standard (Ruotsi)
FRA	Federal Railroad Administration (USA)	STM	Sosiaali- ja terveysministeriö
HKL	Helsingin kaupungin liikelaitos	TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
ISO	International Organization for Standardization	VDV	Vibration Dose Value eli tärinäannos
SNR	Signal to Noise Ratio eli signaali-kohinasuhde (häiriötaso)	VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus
SRMK	Suomen rakentamismääräyskokoelma		

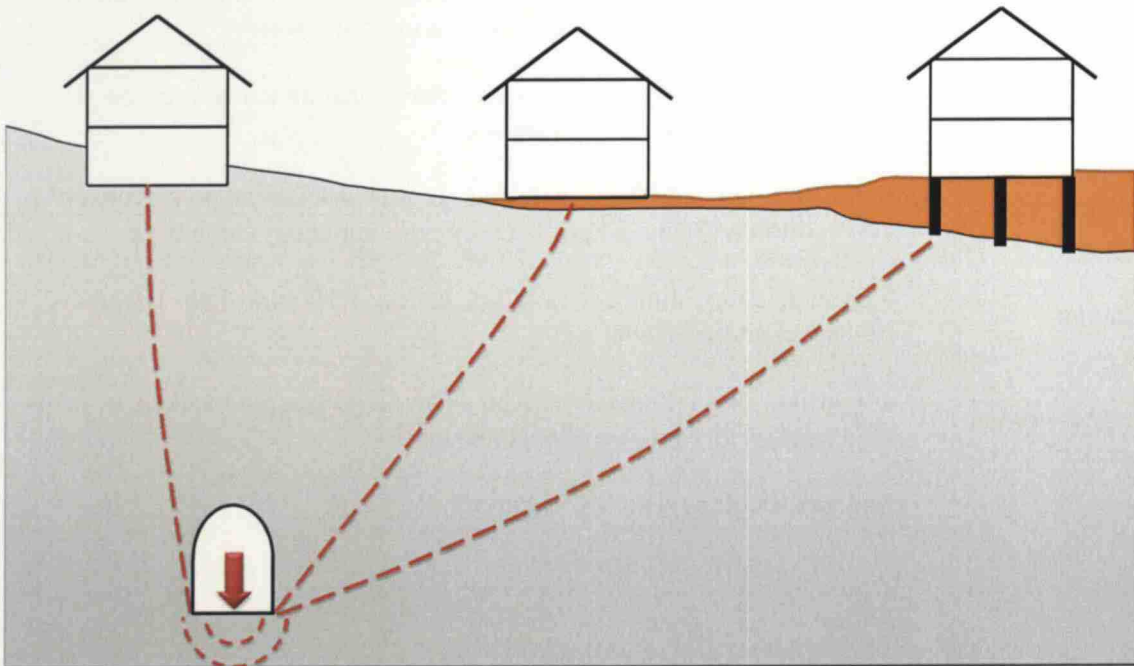
MÄÄRITELMÄT

aksisymmetrinen	Aksisymmetrinen eli pyörähdysymmetrinen. Yleensä pystyakselin ympäri pyörähdysymmetrinen (360°) XY-taso, jolla kuvataan kolmiulotteista puoliavaruutta.
diffraktio	Diffraktiossa aalto taipuu, kun se on kohdannut jonkin rajan. Kohdatu raja toimii uutena värähtelylähteenä.
homogeeninen	Materiaali, joka on tasalaatuista ja tasaisesti jakaantunutta.
infraääni	Ääni, jonka taajuus on alle 20 Hz. Vastoin yleistä uskomusta, myös infraäänit voi kuulla tai aistia, kun ne ovat riittävän voimakkaita.
in situ	Mittaus tai toimenpide suoritetaan paikanpäällä häiriintymättömissä oloissa.
isotrooppinen	Materiaali, jonka ominaisuudet eivät riipu tarkastelusuunnasta (esim. teräs).
kaukokenttä	(engl. <i>Far Field</i>) Yleensä kaukokenttä on etäisyys, joka on paljon suurempi kuin merkittävin aallonpituus.
korruugaatio	Kiskon pintaan muodostuva aaltoileva korkeudenvaihtelu, jolle on ominaista lyhyt aallonpituus (yleensä joitakin senttimetrejä).
lähikenttä	(engl. <i>Near Field</i>) Yleensä lähikenttä on etäisyys, joka on paljon pienempi kuin merkittävin aallonpituus.
Monte Carlo -simulaatio	Numeerisen mallintamisen menetelmä, jossa hyödynnetään todennäköisyysjakaumia ja suurta satunnaistoistojen määrää.
oktaavi	Taajuusero, joka vastaa taajuuden kaksinkertaistumista
ortotrooppinen	Materiaali, jonka ominaisuudet vaihtuvat keskenään kohtisuorassa olevissa suunnissa (esim. puu).
Poraus-räjäytys -louhinta	Louhintatapa, jossa työvaiheet kiertävät järjestyksessä: poraus, pannonstaminen, räjäyttäminen, tuuletus, kuormaus, rusnaus, lujittaminen.
psykoakustiikka	Tieteenala, joka tutkii ihmisten kuuloaistimuksia
referenssikohde	Kohde, jossa dimensiot, materiaaliominaisuudet ja muut laskentaan vaikuttavat seikat ovat (lähes) samanlaiset.
reflektio	Heijastuminen, esimerkiksi aallon heijastuminen vapaasta pinnasta tai eriävien aallonnopeuksien rajapinnasta

refraktio	On muutos aallon suunnassa, johtuen muutoksesta aallon nopeudessa. Refraktio tapahtuu esimerkiksi häiriöiden läheisyydessä ja materiaalien rajapinnassa.
Round Robin -menettely	Koe toistetaan samoin menetelmin ja laitteistoin useassa eri paikassa.
runkomelu	(engl. <i>Structure Borne Noise</i> tai <i>Re-radiated Noise</i>) Taajuudeltaan 30...150 Hz värinää, joka voi siirtyessään rakennuksiin vahvistua ja aiheuttaa häiritsevää melua. (RIL 121-2004)
rusnaus	(engl. <i>Scaling</i>) Löyhästi kalliolla kiinni olevien kivenkappaleiden poistaminen koneellisesti, työkalun avulla tai käsin.
spatiaalinen	adjektiivi, joka viittaa kuvattavan asian avaruutta (tilaa, muotoa ja paikkaa) kuvaaviin ominaisuuksiin
syöttöhäviö	(engl. <i>Insertion Loss</i>) Värinätasojen erotus tarkasteltavan kerroksen yli. Syöttöhäviö kuvaa kerroksen kykyä vaimentaa värähtelyä.
taajuus	Kokonaisia tapahtumia sekunnissa, esim. 10 Hz tarkoittaa 10 tapahtumaa sekunnin aikana.
temporaalinen	adjektiivi, joka viittaa kuvattavan asian aikaa (saapumisaikaa, nopeutta ja kestoja) kuvaaviin ominaisuuksiin
terssi	Kolmasosa oktaavista, ks. oktaavi

1 JOHDANTO

Liikenne ja rakentaminen aiheuttavat haittaa asukkaille, rakenteille ja laitteille. Ihmisiä häiritsevät melu, värinä sekä runkoääni. Rakenteet ovat alttiita värinän aiheuttamille vaurioille ja toimivat etenemiskanavana runkoäänille. Herkät laitteet tai toiminnot voivat häiriintyä värinän vaikutuksesta. Kyseessä oleva fysikaalinen ilmiö on värähtelyn eteneminen väliaineessa ja siihen liittyvä liike-energian siirtyminen.



Kuva 1. Runkoäänen etenemisreitti kalliotunnelista rakennuksiin

Kalliotunnelissa sijaitsevan värähtelylähteen (esimerkiksi metrojunan) ja havaitsijan (esimerkiksi ihminen) välillä on lukuisia aineen rajakerroksia (kuva 1), joihin värähtelyä vaimentavat rakenteet voidaan sijoittaa. Itse värähtelylähteen vaimentaminen ei ole taloudellisesti järkevää, jos havaitsijoita on vähän, värähtelylähteitä on useita tai haittavaikutukset ovat vähäisiä. Vaikutusten merkityksen mittaaminen on hankalaa ja se perustuu tyypillisesti empiirisiin kyselyihin (esimerkiksi norjalainen NS 8176). Taloudellisesta näkökulmasta tulee löytää ratkaisu, joka on värähtelylähteen elinkaaren kannalta edullisin. Tässä näkökulmassa osa ongelmista liittyy kustannusten jakamiseen eri vaiheessa rakennettavien rakenteiden välillä (esimerkiksi metrotunneli ja tuleva maanpäällinen rakentaminen haitta-alueelle).

Laki määrittelee, ettei ympäristöön saa tuottaa melua tai tärinää, joka aiheuttaa vahinkoa tai haittaa omaisuudelle tai sen käytölle (Ympäristönsuojelulaki 4.2.2000/86). Lisäksi rakentamismääräyskokoelmassa vaaditaan rakentajaa selvittämään liikennetärinä ja vaaditaan, ettei se saa aiheuttaa vauriota rakennukselle tai kohtuutonta häiriötä rakennuksessa oleville ihmisille (SRMK B3 2004). Euroopan parlamentin direktiivin 2002/44/EY mukaan työnantajan on poistettava tärinälle altistumista aiheuttavat riskit jo niiden syntyvaiheessa.

Työn tavoitteena on selvittää kalliotunnelissa sijaitsevan ratarakenteen tärinäneristysraken- teiden suunnittelu- ja mitoittamisperiaatteet. Eri maiden raja-arvonormeja verrataan toisiinsa ja niiden lähtökohtina toimineisiin tutkimuksiin ja selvityksiin perehdytään perusteellisesti. Erityisesti keskitytään johdonmukaisen mitoituskäytännön luomiseen ja optimaalisen suunnitteluratkaisun löytämiseen.

Koska värähtelyvaikutukset ovat monimutkaisia ja laajoja käsiteltäväksi, rajattiin työstä pois kaikki maanpäälliset värähtelylähteet (mm. autoliikenne, maanpäällinen rataliikenne, räjäytykset, paalutukset sekä asevaikutukset). Vaikka tunneleita voidaan tehdä myös maa- kerroksiin, katsottiin tarpeelliseksi tarkentaa tarkastelu koskemaan kallioon tehtyjä tunneleita, koska siellä ratarakenteen vaimennus toimii tehokkaimmin. Työssä suoritettut mittaukset rajattiin koskemaan vain metrotunnelin aiheuttamaa värähtelyä.

2 AIEMMAT TUTKIMUKSET

Ratarakenteiden vaimentamista on tutkittu kohtuullisen vähän (tutkimuksia ovat tehneet mm. Nakra 1998, Nielsen 1999 sekä Zheng et al. 2000), kun taas värähtelyjen eteneminen tunnetaan melko hyvin maan parametrien mukaan. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) on tehnyt useampia tutkimuksia liittyen tärinän siirtymiseen (Talja et al. 2008), mit- taamiseen ja luokitukseen (Talja 2004) sekä arviointiin (Törnqvist & Talja 2006). HKL:n toimesta on meneillään pilottihanke liittyen ratapalkin alusmattojen käyttöön. RIL valmistelee TTY:n johdolla kirjajulkaisua kesällä 2009 liittyen rakentamisen aiheuttamiin tärinäi- hin.

Kansallisten värähtelynormien rajojen perusteina on käytetty lukuisia (enimmäkseen empii- risiä) tutkimuksia ja luotettavuus syntyy suurien aineistojen käsittelystä ja kyselyn toistami- sessa useassa eri paikassa (Round Robin -menettely). Esimerkiksi norjalaisen standardin

(NS 8176) pohjana käytettiin tutkimusta, jossa oli 1427 vastaajaa 14 tutkitusta alueesta (Klæboe et al. 2003). Kirjallisuusselvityksiä värähtelyä ja runkomelua koskevista normeista ovat tehneet useat tahot ja tässä työssä tuloksia on pyritty yhdistämään. VTT:n osalta selvityksen on tehnyt Asko Talja (2003). Geoff Leventhall (2003) on tehnyt katsauksen runkomelua koskevista julkaistuista tuloksista.

Ruotsissa tärinän etenemistä maaperässä on selvitetty ja etenkin Lars Hallin (2000) väitöskirja on ansiokas lähde. Väitöskirjassa on vertailtu erilaisia teoreettisia mallintamistapoja ja niiden suhtautumista todellisiin koetuloksiin. Mallinnetuissa tapauksissa heräte sijaitsee pinnalla ja mallinnettava materiaali on pehmeää maata, joten tulokset eivät suoraan sovellu tässä työssä hyödynnettäviksi. Sen sijaan itse laskentamenetelmien voidaan olettaa toimivan myös kovemmalle väliaineelle, koska tärinän elastinen etenemistapa on sama. Toinen laadukas väitöskirja on Mehdi Bahrekazemin (2004) työ, jossa on tutkittu junan aiheuttamaa tärinää. Suomessa raideliikennettä ja sen aiheuttamaa häiriötä on tutkinut Huhtala (2006). Juuri valmistuneessa diplomityössä Hanna Leppänen (2008) on luonut kattavan katsauksen paalutuksen ja pontituksen aiheuttamaan tärinään ja sen leviämiseen.

Minna Kuusisto (2007) on tehnyt kattavan tutkimuksen liittyen kivilajien seismisiin ominaisuuksiin lisensiaatintyössään. Työssä käydään läpi tekijät jotka vaikuttavat seismisiin nopeuksiin ja esitetään mekaaniset ominaisuudet 49 yleisimmälle mineraalille. Työssä on kyetty määrittämään P- ja S-aallonnopeuksien suhde eri kivilajeille, minkä avulla voidaan määrittää kallion mekaaniset ominaisuudet, kun kivilaji ja tiheys tunnetaan.

Tärinää ja runkomelua koskevia rajoituksia annetaan useammassa laissa ja asetuksessa. Juridisia velvoitteita ja rautateiden osalta toteutunutta oikeuskäytäntöä on tutkinut Jari Leppänen (2006).

3 TUTKIMUSAINEISTO

Sallitun tärinähaitan raja-arvojen normivertailua varten käytettiin direktiiviä 2002/44/EY sekä standardeja NS 8176 (2005, Norja), SN 640312a (1992, Sveitsi), SS 460 48 60 (1994, Ruotsi), SS 460 48 61 (1992, Ruotsi), SBR 001S (2003, Hollanti), DIN 4150-1 (2001, Saksa), DIN 4150-2 (1999, Saksa), ANSI S3.29 (1983, USA) sekä ISO 2631-1 (1997). Standardien perusteina toimineisiin tutkimuksiin perehdyttiin valitsemalla edustava otanta kus-

takin standardista. Metrojunan akselipainojen aiheuttama teoreettinen värinäheräte määritettiin HKL:ltä saatujen tietojen perusteella.

Värinän etenemisen ja rakenteeseen siirtymisen analysointia varten tuotettiin omia mittauksia neljästä paikasta. Ensimmäiset mittaukset suoritettiin maan alla Kampin metroaseman itäpuolella. Toinen mittaussarja tehtiin Puotilassa lähellä kalliotunnelin itäpäättä. Kolmas mittaussarja suoritettiin Puotilan kalliotunnelin suuaukon luona, Juorumäenkuja 1:ssä. Neljäs mittaussarja suoritettiin Kalliosuunnittelu Oy:n avokonttorissa Pasilassa. Mittausten tuloksena kerättiin 1539 yksittäistä värinämittaustulosta (joissa kussakin kolme ortogonaalista kanavaa ja resultantti) sekä 19 äänenpainemittausta (lineaarinen ja A-painotettu äänenpainetessikaistoittain ja resultanttina).

Teoreettista aineistoa tutkittiin käyttäen vertailukohtana mittaustuloksia. Aineiston lähtökohtana käytettiin kirjallisuudesta selvitettyjä perusteita mallien rakentamiselle. Yksidimensionaalisen mallin formulaatio tehtiin omien otaksumien perusteella. Teoreettisiin malleihin syötettiin värinämittauksia vastaavat lähtötiedot ja malleista syntynyttä aineistoa verrattiin todellisiin mittaustuloksiin.

4 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tutkimusmenetelmänä käytettiin vertailevaa kirjallisuustutkimusta. Vertailussa keskityttiin mitoitusnormien eroihin ja normien perusteina toimineiden tutkimusten luotettavuuden arviointiin. Mitoittamista tutkittiin normien, FEM-mallintamisen ja värinämittauksen keinoin.

Potentiaalisen mittauspaikan etsiminen suoritettiin äänenpainemittarilla metrojunan sisäpuolelta. Alustavat mittaukset mittauspaikassa suoritettiin kahden värinäanturin sekä äänenpainemittarin avulla ja runkomelukohteissa pelkän äänenpainemittarin avulla. Varsinaiset mittaukset suoritettiin viidellä värinäanturilla ja äänenpainemittarilla. Koejärjestelyt on esitetty yksityiskohtaisemmin kappaleessa 13 ja mittauksista saatuja tuloksia on käsitelty kappaleessa 14.

Virhearviointi tehtiin tilastollisten aineistojen pohjalta otaksuen suuret normaalijakautuneiksi ja toisistaan riippumattomiksi. Yksittäisten suureiden virheen vaikutusta kokonaistulokseen arvioitiin varioimalla tutkittavaa suuretta sen tyypillisestä arvosta. Hyväksyttävien

tilastollisen luotettavuuden rajojen määrittämiseksi käytettiin vakiintunutta tieteellistä käytäntöä sekä voimassa olevaa suunnittelunormiston määrittelemää luottamustasoa.

5 KESKEISET KÄSITTEET

5.1 Lähtötietotaso

Seuraavilla sivuilla selitetään lyhyesti työn kannalta keskeiset käsitteet. Lukijalla oletetaan olevan perustiedot värähtelyliikkeestä ja akustiikasta. Värähtelyyn ja akustiikkaan perehtymättömälle suositellaan luettavaksi RIL 243-1-2007, Tanttari & Saarinen 1995 tai Talja 2004. Työ on kirjoitettu siten, että tuloksia ja suosituksia voi hyödyntää ilman syvempää ymmärtämystä, mutta mallinnuksen perusteiden ja johtopäätösten ymmärtäminen edellyttää perustietojen hallintaa.

5.2 Desibeliasteikko

Melu- ja värähtelymittaukset voidaan esittää 10-kantaisella logaritmilla. Muunnoksen perusmuoto on

$$L_x = y \log \left(\frac{x}{x_0} \right), \quad (1)$$

jossa x on mitattava suure (esim. äänenpaine, nopeus, kiihtyvyys)
 x_0 on mitattavaan suureeseen liittyvä vertailuarvo
 y on kerroin, jonka arvo riippuu suureen luonteesta (10 tai 20).

Vastaavasti tutkittava suure voidaan johtaa desibeliarvosta (ja vertailuarvosta)

$$x = 10^{\frac{L_x}{y}} \cdot x_0, \quad (2)$$

jossa L_x on mitattavan suureen desibeliarvoinen taso
 x_0 on mitattavaan suureeseen liittyvä vertailuarvo
 y on kerroin, jonka arvo riippuu suureen luonteesta (10 tai 20).

Koska desiBeli (dB) ei ole vakioarvoinen yksikkö, tulee desibelimittausten yhteydessä esittää käytetty vertailuarvo. Vertailuarvo merkitään merkinnällä ”re”, esimerkiksi

L_p re 50 nm/s. Alla on esitetty yleisesti käytetyt vertailuarvot ja kertoimet suureille äänitaso

$$L_p = 20 \log \left(\frac{P}{2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}} \right), \quad (3)$$

intensiteettitaso

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{2 \cdot 10^{-12} \frac{W}{m^2}} \right), \quad (4)$$

äänitehotaso

$$L_W = 10 \log \left(\frac{P}{2 \cdot 10^{-12} W} \right), \quad (5)$$

nopeustaso¹

$$L_v = 20 \log \left(\frac{v}{50 \cdot 10^{-9} \frac{m}{s}} \right) \quad (6)$$

ja kiihtyvyydestaso²

$$L_a = 20 \log \left(\frac{a}{2 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s^2}} \right). \quad (7)$$

(Tanttari & Saarinen, 1995)

5.3 Taajuuskaistat

Tärinän voimakkuus riippuu taajuudesta, millä sitä tarkastellaan. Koko taajuusalueen yli summattu taso kertoo ainoastaan yhteisvaikutuksen voimakkuuden. Jos halutaan tietää tarkemmin, minkä taajuisista komponenteista signaali on muodostunut, voidaan signaali jakaa osiin taajuusalueittain. Näitä osia nimitetään kaistoiksi, menettelyä kutsutaan taajuusanalyysiksi ja syntyvää voimakkuus-taajuus –kuvaajaa taajuusspektriiksi. Taajuudet jaetaan yleensä oktaaveihin, mikä vastaa taajuuden kaksinkertaistumista (2 Hz, 4 Hz, 8 Hz...) tai

¹ Tanttari & Saarisen mukaan vertailuarvo on $2 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$

² Käytetään myös vertailuarvoa 10^{-6} m/s^2

kolmannesoktaaveihin (eli tersseihin), mikä jakaa kunkin oktaavin edelleen kolmeen (logaritmiseen) osaan. Oktaavit (0,125 Hz ... 250 Hz) voi muodostaa kaavalla

$$O_n = 10^{\frac{3 \cdot n}{10}} \text{ Hz}, n = -3, -2, -1 \dots 8 \quad (8)$$

ja kolmannesoktaavit eli terssit (0,100 Hz ... 400 Hz) kaavalla

$$T_n = 10^{\frac{n}{10}} \text{ Hz}, n = -10, -9, -8 \dots 26. \quad (9)$$

Listatärinän ja runkoäänen kannalta merkittävistä taajuuskaistoista on työn liitteenä A.

5.4 Painotusfunktiot

Painottamalla mitattuja taajuusspektrejä, voidaan ottaa huomioon ihmiskehon herkkyys eri taajuusalueille. Ihmisen keho on eri tavalla herkkä melulle, heilahdusnopeudelle ja kiihtyvyydelle, joten niille on kullekin omat painotusfunktionsa. Tunnetuin painotusfunktio on epäilemättä A-painotus melulle, joka perustuu Fletcherin ja Munsonin tutkimuksiin vuonna 1933. Uusimman ISO 226 standardin (2003) mukaan heidän tutkimuksensa on edelleen käyttökelpoinen taajuusalueella 600 Hz – 20 kHz. Alhaisilla taajuuksilla (20 Hz – 100 Hz) havaitsemiskynnys on osoittautunut korkeammaksi kuin aiemmin on luultu.

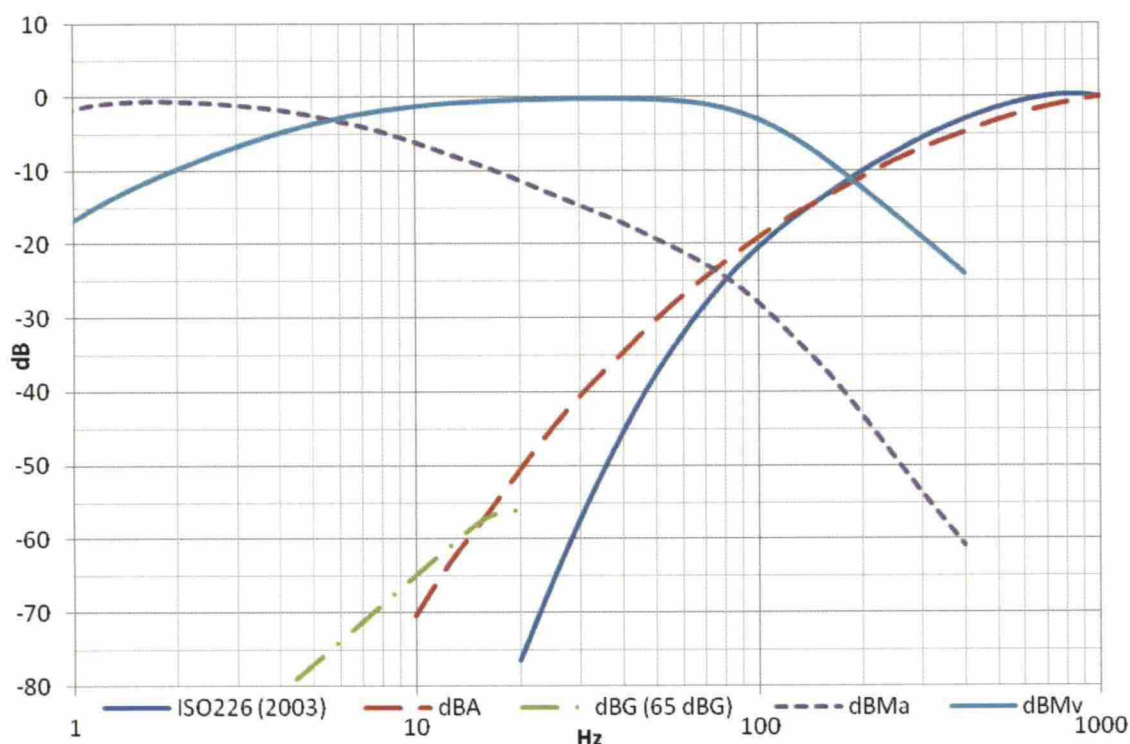
Nykytiedon (2008) mukaan A-taajuuspainotus on ylikonservatiivinen taajuusalueella 20 Hz – 100 Hz (kuva 2). Tämä näkyy hyvin desibeliarvoin kuvatuissa matalataajuuksisen melun raja-arvoissa, joissa alataajuuksien arvot ovat hyvin suuria (56 dB) ja korkeammat taajuudet vastaavasti pieniä (32 dB). Infraäänien (0 Hz – 20 Hz) kuvaamiseen A-painotus ei sovellu lainkaan, vaan siihen käytetään G-painotusta. Painotusfunktioita B, C ja D ei enää juuri-kaan käytetä. Kehoon suoraan³ välittyvän värähtelyn painotuksena käytetään M-painotusta (W_m -painotusfunktio). Painotusfunktioiden painotustaulukot on esitetty liitteessä B1 ja taajuusalueen 0,1 Hz – 20 000 Hz kattava kuva painotusfunktioista liitteenä B2.

Painotettuihin arvoihin viitataan merkinnällä L_A , dBA tai dB[A], jossa A viittaa A-painotukseen. Näistä toivottava merkintätapa on ensimmäinen, vaikka jälkimmäistä kahta tapaa käytetään myös yleisesti. Painottamattomiin tuloksiin voidaan viitata kirjaintunnuk-

³ ihmisen kehoon kiinteästä kappaleesta kontaktilla välittyvä värähtely

sella Z (standardin IEC 61672-1 mukaisesti). Vanhempi tapa on jättää tunnus pois tai käyttää englanninkielisiä merkintöjä *linear* tai *unweighted*.

Kehon tunteman tärinän kannalta merkittävät taajuudet ovat 0 Hz – 20 Hz ja korvin kuultavan runkoäänen merkittävät taajuudet mahdollisimman korkeita 1000 Hz asti. Tästä seuraa se, että runkoäänen kannalta merkittävimmät taajuudet ovat tärinän korkeimman taajuuspiikin taajuudet. Toisaalta korkeataajuuksinen tärinä vaimenee nopeammin, joten sääntö ei päde, jos tärinän kulkema matka tai taajuusero piikkien välillä on suuri. Tyypillisesti runkomelun merkittävien taajuuksien alaraja on noin 25 Hz ja yläraja noin 200 Hz – 250 Hz.



Kuva 2. A-, G- ja M-taajuuspainotukset sekä ISO 226 (2003) mukainen havaitsemiskynnys

5.5 Tehollisarvo (RMS)

Värähtely sisältää sekä positiivisia että negatiivisia huippuarvoja. Jos värähtelystä otettaisiin keskiarvo, se olisi lähellä nollatasoa. Värähtelyn suuruutta arvioidaan yleensä huippuarvojen (PV), huipusta huippuun arvojen (PPV) tai tehollisarvon (RMS) avulla. Taajuuspainotettu tehollisarvo määritellään SFS-EN 8041 mukaan:

$$a_{w,\theta}(t) = \sqrt{\frac{1}{\theta} \int_{t-\theta}^t a_w^2(\zeta) d\zeta}, \quad (10)$$

jossa $a_w(\zeta)$ on taajuuspainotettu hetkellisen kiihtyvyyden arvo
 θ on mittauksen integraatioaika⁴
 t on hetkellinen aika.

Värähtelyn neliöiminen muuttaa myös negatiiviset huiput positiivisiksi ja mahdollistaa siten värähtelyn suuruuden arvioinnin. Neliöiminen myös korostaa huippujen merkitystä signaalissa, mistä voi olla hyötyä tai haittaa tilanteesta riippuen.

6 VÄRÄHTELYILMIÖ

6.1 Erilaiset värähtelyliikkeet

6.1.1 Aaltotyypit

Aaltona etenevä värähtelyliike jaetaan kahteen pääaaltotyyppiin, runkoaaltoihin (engl. *body waves*) ja pinta-aaltoihin (engl. *surface waves*). Runkoaaltoihin kuuluvat puristusaalto (P-aalto) sekä leikkausaalto (S-aalto). Pinta-aalloista merkittävimmät⁵ ovat Love-aalto sekä Rayleigh-aalto. Energian voidaan otaksua⁶ jakaantuvan 67 % Rayleigh-aaltoihin, 26 % leikkausaaltoihin ja 7 % puristusaaltoihin. (Hall 2000 viitaten Miller & Pursey 1954) Koska pinta-aallot ja runkoaallot vaimenevat eri tavalla on energian jakauma riippuvainen myös tarkasteluetäisyydestä (runko-aaltojen osuudet pienenevät etäisyyden kasvaessa).

6.1.2 P-aalto

P- eli primaariaalto (puristusaalto) on runkoaalto, joka etenee väliaineessa tiivistämällä materiaalia edessään ja laajentamalla sitä perässään. Etenemistavastaan johtuen, se etenee hyvin materiaaleissa, joiden kuormituskäyttäytyminen on lineaarista. P-aallon etenemisnopeus on

$$v_P = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (11)$$

jossa M on kokoonpuristuvuusmoduuli

⁴ Nopea (FAST tai F) 0,125 s; hidas (SLOW tai S) 1,000 s; pitkä (LONG tai L) 8,000 s

⁵ vähemmän merkittäviä pinta-aaltoja ovat esim. Stoneley-aalto, C-aalto ja H-aalto

⁶ Millerin ja Purseyn tutkimus perustuu pyöreän kiekon värähtelyyn isotrooppisella homogeenisellä alustalla

- ρ on tiheys
 E on kimmomoduuli
 ν on Poissonin luku.

(Klein & Rainer 1995)

6.1.3 S-aalto

S- eli sekundaariaalto (leikkausaalto) on runkoaalto, joka etenee siirtämällä materiaalia etenemissuuntaansa poikittaisessa suunnassa kohtisuoraan pintaa vastaan. S-aalto voi edetä ainoastaan kiinteissä aineissa leikkausmuodonmuutoksen välityksellä; se ei etene nesteissä eikä kaasuissa. S-aallon etenemisnopeus on

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}, \quad (12)$$

jossa G on leikkausmoduuli.

(Klein & Rainer 1995)

Leikkausaallon ja puristusaallon nopeuksien suhde riippuu Poissonin luvusta

$$\frac{v_s}{v_p} = \frac{\sqrt{\frac{1}{2}}}{\sqrt{\frac{1-\nu}{1-2\nu}}} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2-2\nu}}. \quad (13)$$

Tyypillisillä Poissonin luvun arvoilla ($\nu = 0,25$) leikkausaallon (v_s) nopeus on noin 58 % puristusaallon (v_p) nopeudesta

$$\frac{v_s}{v_p} = \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0,57735 \text{ eli}$$

P-aallon ja S-aallon nopeuksien välinen suhde on 1,732 : 1.

6.1.4 Love-aalto

Love-aalto⁷ (joskus myös Q-aalto tai SH-aalto) on pinta-aalto, joka etenee siirtämällä materiaalia materiaalin rajapinnassa etenemissuuntaansa poikittaisessa suunnassa pinnan tasos-

⁷ Aalto on nimetty englantilaisen matemaatikon A.E.H. Loven (1863-1940) mukaan.

sa. Love-aalto on leikkausaalto, joka on polarisoitunut aallon etenemissuuntaan nähden kohtisuoraan pintaan. Se vaimenee kuten muutkin pinta-aallot.

6.1.5 Rayleigh-aalto

Rayleigh-aalto⁸ on pinta-aalto, joka etenee siirtämällä materiaalihiukkasia ellipsin muodossa etenemissuunnassa. Värähtelyn amplitudi heikkenee voimakkaasti, kun kohtisuora etäisyys pinnasta kasvaa⁹. Approksimaatio aallon nopeudelle on

$$v_R = v_S \frac{0,86 + 1,14\nu}{1 + \nu} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} \frac{0,86 + 1,14\nu}{1 + \nu}. \quad (14)$$

(Klein & Rainer 1995)

Toinen lähes identtinen approksimaatio on

$$v_R = v_S \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu}. \quad (15)$$

(Hall 2000)

6.2 Värähtelyn vaimeneminen

6.2.1 Geometrinen vaimeneminen

Golitsin (1912) esitti pinta-aaltojen vaimenemiselle kaavan

$$u_2 = u_1 \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} e^{-\gamma(r_2 - r_1)}, \quad (16)$$

jossa	u_1	on aaltoliikkeen amplitudi pisteessä yksi
	u_2	on aaltoliikkeen amplitudi pisteessä kaksi
	r_1	on etäisyys pisteeseen yksi
	r_2	on etäisyys pisteeseen kaksi
	γ	on vaimennusvakio.

Vaimennusvakio γ voidaan määrittää kaavalla

⁸ Aalto tunnetaan myös nimellä Rayleigh-Lamb -aalto. Rayleigh-aalto on nimetty englantilaisen fyysikon John W. Strutt (1842-1919) mukaan, joka oli Rayleighin kolmas paroni.

⁹ aallonpituuden syvyydellä pystyamplitudi on enää 18 % ... 24 % pinnan pystyamplitudista ja vaaka-amplitudi on enää 11 % pinnan vaaka-amplitudista (Klein & Rainer 1995)

$$\gamma = \frac{2\pi\zeta}{\lambda} = \frac{2\pi\zeta f}{v}, \quad (17)$$

jossa λ on aaltoliikkeen aallonpituus
 f on aaltoliikkeen taajuus
 v on aallonnopeus
 ζ on materiaalin vaimennussuhde.

Golitsinin kaava voidaan esittää laajennetussa muodossa

$$u_2 = u_1 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^n e^{-\gamma(r_2-r_1)}, \quad (18)$$

jossa n on tekijä, joka riippuu lähteen geometriasta ja aaltotyyppistä.

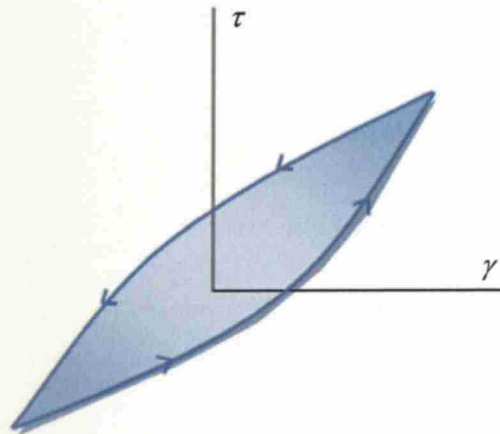
Johtuen liike-energian lausekkeesta, n on aaltorintaman pinta-alojen suhteen neliö (suhteen johto on esitetty liitteessä C). Tekijän n tavalliset arvot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Tekijän n tyypillisiä arvoja

Lähteen tyyppi	Aallon tyyppi	Pinta-alojen suhde	Amplitudien suhde	n
pistelähde	pinta-aalto	$\frac{r_1}{r_2}$	$\sqrt{\frac{r_1}{r_2}}$	0,5
pistelähde	runkoaalto	$\left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2$	$\frac{r_1}{r_2}$	1
viivalähde	pinta-aalto	$\left(\frac{r_1}{r_2} \right)^0$	$\left(\frac{r_1}{r_2} \right)^0$	0
viivalähde	runko-aalto	$\frac{r_1}{r_2}$	$\sqrt{\frac{r_1}{r_2}}$	0,5

6.2.2 Materiaalivaimennus

Materiaalivaimentuminen johtuu energiahäviöistä (mikrorakojen muodostuminen, ilmaään syntyminen, refraktio, reflektio, diffraktio, kitka jne.) ja sitä kuvaa parhaiten jännitystilan ja siirtymän välinen hystereesisilmukka. Skemaattinen leikkausjännityksen (τ) ja leikkausmuodonmuutoksen (γ) hystereesisilmukka on esitettynä kuvassa 3.

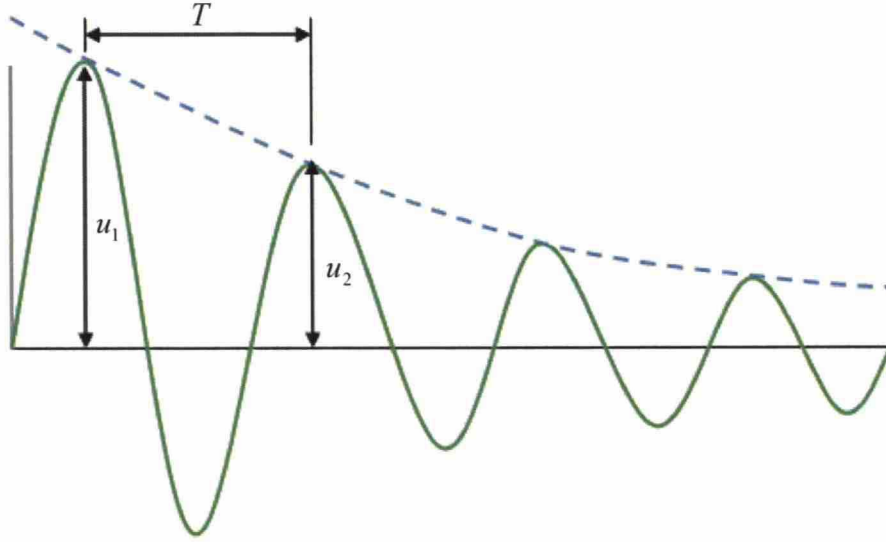


Kuva 3. Havainnekuva hystereesisilmukasta ilman alkuperäistä kuormituspolkua

Silmukan sisään jäävä alue on menetettyä työtä. Mitä useammin sykliä toistetaan, sitä enemmän energia hukkuu. Tästä seuraa, että korkeammat taajuudet menettävät enemmän energiaa kuin matalat ja niiden materiaalivaimennus on siksi suurempi. Käytännön suunnittelutehtävissä tulee tuntea materiaalin vaimennussuhde (ζ), joka vaikuttaa vaimennusvakioon (γ) kaavassa 17. Kun värähtelysignaali on riittävän laadukasta, voidaan vaimennussuhde määrittää perättäisten amplitudien suhteena (ks. kuva 4) kaavalla

$$\zeta = \frac{\ln\left(\frac{u_2}{u_1}\right)}{2\pi}, \quad (19)$$

jossa u_1 on aaltoliikkeen amplitudi alussa
 u_2 on aaltoliikkeen amplitudi jaksonajan (T) kuluttua.



Kuva 4. Vaimennussuhteen määrittäminen peräkkäisistä amplitudeista

Jos amplitudien ero on pieni, tulee ero mitata pidemmältä ajanjaksolta, jolloin kaava 19 saa muodon

$$\zeta = \frac{\frac{1}{n} \ln\left(\frac{u_2}{u_1}\right)}{\sqrt{4\pi^2 - \left[\frac{1}{n} \ln\left(\frac{u_2}{u_1}\right)\right]^2}}, \quad (19b)$$

jossa n on syklien lukumäärä amplitudien välissä.

Tyypillisiä arvoja vaimennussuhteille (in situ) on esitetty taulukossa 2. Todelliset arvot vaihtelevat aina jonkin verran riippuen käytetyn materiaalin lujuudesta, liitoksista sekä pintarakenteista. Arvoja voi käyttää alustavaan suunnitteluun tai materiaalivaimennuksen suurusluokan arviointiin.

Taulukko 2. Materiaalien vaimennussuhteita ja vahvennuskertoimia resonanssitilanteessa

Materiaali	Vaimennussuhde	Vahvennuskerroin (kun $r = 1$)
	ζ [%]	μ
silttinen hiekka	3,0 – 10,0	5 – 17
kumi	5,0	10
hiekkä	4,0 – 6,0	8 – 12,5
savi	2,0 – 7,0	7 – 25
puu (tammi)	0,5	100
kipsi	0,3	167
teräs	0,1 – 0,2	250 – 500
betoni (esijännitetty)	4,0 – 7,0	7 – 12,5
betoni (halkeilematon)	0,7 – 1,0	50 – 71
betoni (halkeillut)	0,5 – 0,8	62,5 – 100

(yhdistetty useasta lähteestä:

Hall 2000, Cremer & Heckl 1988, Mahrenholtz & Bachmann 1995)

6.3 Värähtelyn eteneminen kallioperässä

Kalliotunnelien tapauksessa pinta-aallot eivät tule etenemistapana kyseeseen. Kun puhutaan kalliotunneleista lähtöisin olevasta värähtelystä, tarkoitetaan siis pääasiassa S- ja P-aaltojen aiheuttamaa värähtelyä. Taulukossa 3 on esitetty kivilajeille tyypillisiä mekaanisia ominaisuuksia, joita voidaan käyttää alustavien analyysien lähtötietoina.

Taulukko 3. Kivilajien mekaanisia ominaisuuksia (lasketut arvot on esitetty kursivilla)

Materiaali	Elastiset aallonnopeudet (in situ)		Poissonin luku	Tiheys	Leikkausmoduuli
	c_P [m/s]	c_S [m/s]			
graniitti	3150 – 5400	1840 – 3150	0,10 – 0,33 0,24	2570 – 2750	15,7 – 28,0
granodioriitti	2910 – 6100	1710 – 3580	0,15 – 0,25 0,24	2590 – 2790	26,7
dioriitti	6420	3650	0,20 – 0,30 0,26	2640 – 2830	37,0
gabro	7060	3820	0,38 0,29	2780 – 2960	40,0 – 49,0

graniitti- gneissi	2900 – 5400	1690 – 3150	0,10 – 0,30 0,24	2580 – 2780	15,8
kiillegneissi	5500 – 6300	2650 – 3175	0,20 – 0,24	2660 – 2880	26,8 – 27,7
amfiboliitti	6760	3850	0,30 0,26	2720 – 2890	44,3
kvartsiitti	5900	3990	0,10 – 0,33 0,08	2610 – 2670	27,8 – 32,0
kiilleliuske	6170	3472	0,27	2620 – 2840	33,0

(yhdistetty useasta lähteestä:

Patrikainen 1983 viitaten Niini et al. 1982 ja Patrikainen 1982;

Soveri & Kauranne 1995 viitaten Zaleskii 1967;

Mononen 2003 viitaten Pajunen et al. 2002, Peltoniemi 1988 ja Syrjänen 1997;

Kuusisto 2007 viitaten Christensen & Mooney 1995 ja Kukkonen et al. 2003;

Gercek 2006 viitaten Vutukuri et al. 1974, Hatheway & Kiersch 1989, METU 1989a,

METU 1989b ja METU 1989c;

Riekkola 1976 viitaten Kauranne 1968 ja Visti 1973 sekä

Majapuro 2006 ja Eloranta 2006)

6.4 Värähtelyn vaimeneminen kallioperässä

Värähtelyn vaimeneminen kallioperässä voi johtua rakojen aiheuttamista häviöistä (jotka ovat erityisen suuria lyhyille aallonpituuksille). Jos rako on vesi- ja/tai ilmatäytteinen ei S-aalto kykene läpäisemään rakopintaa. Kivisiltoja pitkin etenevä S-aalto vaimenee huomattavasti rakoja kohdatessaan. Rakoilun vaikutus matalataajuuksiseen tärinään on vähäinen, koska raon mitta suhteessa aallonpituuteen jää hyvin pieneksi¹⁰.

Kallion vauriot (ruhjeet, maatytytteiset vauriokohdat, murskealueet) voivat pysäyttää tärinän etenemisen kokonaan. Vauriovyöhykkeitä voidaan paikantaa ja niiden laajuutta voidaan arvioida värähtelyn avulla (esim. seisminen luotaus). Heijastukset läheisistä vapaista pinoista ja vaurioista voivat häiritä värähtelysignaalia, sillä aalto etenee kalliossa hyvin suurella nopeudella.

¹⁰ esim. 100 Hz värähtelyn aallonpituus voisi olla 45 m, jolloin suhde 4 mm rako on olisi 1/11250

6.5 Värähtelyn eteneminen maaperässä

Värähtelyyn etenemiseen maaperässä vaikuttavat samat mekaaniset ominaisuudet kuin värähtelyn etenemiseen kalliossa. Huokoisessa vedellä kyllästyneessä maaperässä veden nopeus (vedelle puristusaallon nopeus on noin 1500 m/s ja Poissonin luku, ν on lähes 0,50) dominoi P-aallon etenemisnopeutta. Vedellä kyllästymättömässä maassa maan tiiviys vaikuttaa aallon nopeuksiin. Vesipitoisuus ei vaikuta S-aallon nopeutta kasvattavasti, koska leikkausaallot eivät etene nesteissä. Suuri vesipitoisuus voi irrottaa runkoainepartikkeleita toisistaan ja siten alentaa P-aallon nopeutta. Oheiseen taulukkoon 4 on toistettu tyypillisiä maaperän mekaanisia ominaisuuksia, joita voidaan käyttää alustavien analyysien lähtötietoina.

Taulukko 4. Maalajien mekaanisia ominaisuuksia (Hall 2000 viitaten Head & Jardine 1992)

Materiaali	Elastiset aallon- nopeudet (in situ)		Poissonin luku	Tiheys	Leikkaus- moduuli
	$c_p \left[\frac{m}{s} \right]$	$c_s \left[\frac{m}{s} \right]$	ν	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$G \left[\frac{MN}{m^2} \right]$
löyhä hiekka (kyllästetty)	185 – 450 (1450 – 1550)	100 – 250	0,30 – 0,35 (0,48 – 0,50)	1500 – 1800	15 – 110
tavanomai- nen hiekka (kyllästetty)	325 – 650 (1500 – 1750)	200 – 350	0,20 – 0,30 (0,47 – 0,49)	1700 – 2100	70 – 250
tiivis hiekka (kyllästetty)	550 – 1300 (1700 – 2000)	350 – 700	0,15 – 0,30 (0,45 – 0,48)	1900 – 2200	230 – 1000
pehmeä savi	1450 – 1550	80 – 180	0,47 – 0,50	1600 – 2000	10 – 65
tukeva savi	1500 – 1700	180 – 300	0,47 – 0,50	1700 – 2100	55 – 190
jäykkä savi	1600 – 1900	300 – 500	0,47 – 0,50	1800 – 2300	160 – 450
hiekkakivi	1400 – 4000	800 – 2000	0,25 – 0,35	2000 – 2400	1300 – 9500
kalkkikivi	2100 – 6000	1200 – 3000	0,25 – 0,35	1800 – 2500	2600–20000
magma- kivi tai metamor- finen kivi	3500 – 7000	2000 – 3500	0,25 – 0,35	2200 – 2600	8500–32000

6.6 Värähtelyn vaimeneminen maaperässä

Värähtelyn vaimenemiseen maaperässä liittyy muutamia erityiskohtia. Maan vesipitoisuus vaikuttaa värähtelyn vaimentumiseen keskeisesti. Jos vesipitoisuus on suuri, ei materiaalivaimennuksen osuus vaimentumisesta ole merkittävä. Vesipitoisuus vaikuttaa vain P-aaltojen etenemiseen, sillä S-aallot eivät etene veden välittämänä. Talvella maakerrosten jäätyminen voi aiheuttaa värähtelyn vaimentumista, joten mittauksia suoritettaessa maa ei saa olla routinutta.

Maaperässä voi olla maakerroksia, jotka voivat esiintyä myös limittäin. Kerroksien paksuus vaihtelee ja lisäksi pohjaveden korkeus ja siihen liittyvä maakerroksen vesipitoisuus vaihtelee alueittain. Värähtely voi edetä kalliopintaan asti ja kulkea kalliota pitkin ennen paluuta maanpinnalle havainnointikohteeseen. Maakerrosten ominaisuuksien arvot ovat etenkin pehmeillä mailla alhaisia, jolloin resonanssin voimakkuudesta ja herätteen taajuussisällöstä riippuen värähtely voi vahvistua tai heikentyä voimakkaasti paikallisesti riippuen tarkastelukohtaan maakerroksen paksuudesta. Värähtely voi käyttäytyä maaperässä paljon arvaamattomammin kuin kallioperässä.

6.7 Ongelman erityispiirteitä

6.7.1 Peittäminen

Voimakkuudeltaan toisiaan lähellä olevat äänilähteet lisäävät vallitsevaa kokonaisvoimakkuutta. Jos yksittäisen äänilähteen voimakkuus suhteessa kokonaisvoimakkuuteen on pieni, on sen havaitseminen ihmiselle vaikeaa. Näin ihmiset kokevat yksittäiset häiriölähteet vähemmän häiritseviksi, kun taustamelutaso kasvaa. Samalla kuitenkin puheen ja musiikin erottaminen vaikeutuu. Ilmiötä sanotaan äänen peittymiseksi (engl. *masking*).

Hyvin hiljaisissa ympäristöissä erityisesti pulssimaiset signaalit erottuvat erityisen hyvin, koska niiden ero taustamelutasoon kasvaa. Yleensä ilmastointilaitteiden tuottama taustamelutaso on luokkaa 35 dB ... 40 dB. Erottuvuutta voidaan kuvata signaalin ja taustakohinan välisellä tasolla (dB, engl. *Signal to Noise Ratio*). Norjan standardin NS 8176 mukaan tehdyssä mitoituksessa mitattavan värähtelysignaalin SNR-tason tulee olla 10 dB, jolloin mitattava värähtely on noin kolme kertaa voimakkaampaa kuin taustataso.

6.7.2 Herkistyminen

Aivot suodattavat aistien tuottamaa informaatiota. Kun aistien huomio kohdistetaan tiettyyn ilmiöön, saadaan siitä enemmän tietoista informaatiota. Tärinän osalta huomion kiinnittymistä voivat aiheuttaa yksittäiset suuremmat tärähdykset, jonka jälkeen havaitsija alkaa kiinnittää huomiotaan enemmän myös sellaisiin tärinäihin, joita hän ei aiemmin kokenut häiritseväksi.

Myös varomaton kysymyksenasettelu tärinätutkimuksissa voi tuottaa vääristyneitä tuloksia herkistymisen seurauksena. Tämä käy ilmi kysyttäessä tärinähaittaa myöhemmin uudelleen identtisellä kyselyllä, jolloin tärinän häiritsevyys on lisääntynyt (oletettavasti herkistymisen seurauksena, ellei mitattava tärinätaso ole kasvanut). Tutkimuksissa pitää pyrkiä minimoimaan huomion kiinnittäminen tutkittavaan ilmiöön ja keskittyä ensimmäisenä saatuihin tuloksiin.

6.7.3 Resonanssi

Kun rakenteen ominaistaajuus on lähellä herätteen taajuutta, syntyy resonanssi-ilmiö. Ilmiötä voi verrata heiluriin eli esimerkiksi keinuvaan lapseen, jolle annetaan vauhtia. Keinulapsi -systeemi heiluu tietyllä kulmanopeudella ja antamalla juuri oikeassa kohdassa lisää vauhtia saadaan heilumisen amplitudia kasvatettua voimakkaasti. Jos vauhtia annetaan paljon useammin kuin keinun ominaistaajuus, vauhti kasvaa vain vähän. Jos vauhtia annetaan harvemmin kuin keinun ominaistaajuus, amplitudi heikkenee.

Vaikka värähtely olisi heikkoa tai olematonta, jos se jatkuu riittävän kauan samanlaisena, voi amplitudi kasvaa resonanssitaajuudella merkittäväksi. Vaikka rakenteella on useampia resonanssitaajuuksia, on yleensä riittävää määrittää alin eli dominoiva resonanssitaajuus.

6.7.4 Interferenssi

Kahden tai useamman aallon kohdatessa ne summautuvat. Riippuen aaltojen vaihe-erosta tämä voi tarkoittaa joko yhteenlaskua (värähtely voimistuu) tai erotusta (värähtely heikkenee). Seisova aalto on seurausta tasaisella nopeudella etenevän aallon interferenssistä. Koska aallot heijastuvat ja taittuvat sekä kulkevat eri nopeudella eri materiaaleissa on interferenssikohtia runsaasti ja ne liikkuvat ajan funktiona ellei heräte ole vakio. Interferenssin

tutkimiseksi mallin pitää olla riittävän tarkka ja kyetä ottamaan huomioon interferenssin synnyttävät geometriat tai etenemisnopeuksien erot sekä aaltojen summautuminen.

Interferenssikohtien ja sen suuruuden ennustaminen on huomattavasti vaativampaa kuin resonanssin tutkiminen. Käytännössä voi olla luotettavampaa huomioida interferenssin mahdollisuus tilastollisesti ja käsitellä sitä riskinä, joka otetaan huomioon varmuuskertomella.

6.7.5 Haas-vaikutus

Kun kahden perättäisen äänen ero on enintään 35 – 40 millisekuntia ihminen aistii ne samana äänenä ja äänenpaine yhdistetään alkuperäisen äänen äänenpaineeseen¹¹. Tavanomaisessa huoneessa on yleensä vastakkaisilla puolilla tasorakenteita (kuten seinä, lattia tai katto), jotka Haas-vaikutuksen seurauksena luovat huoneeseen laajoja alueita, joissa tasoista emittoituvan runkoäänen voimakkuudet yhdistyvät (interferenssi) toisiinsa. Haas-vaikutus lisää runkoäänen aiheuttamia ongelmia ja vaikeuttaa sen vaimentamista huoneessa entisestään. Haas-vaikutus on psykoakustinen ilmiö eikä ilmiöllä ole mitään fysikaalista selitystä.

7 MAANALAISET VÄRÄHTELYLÄHTEET

7.1 Ajoneuvoliikenne

Ajoneuvoliikenne aiheuttaa maan alla samanlaisen värähtelyherätteen kuin kallion päällä maanpinnalla. Koska kallioperä toimii massiivisena äänenvaimentimena, ei ilmaaänen (melun) osuutta tarvitse tarkastella tunnelissa. Sen sijaan tärinä etenee kallioperässä hyvin ja se voi olla raskaan ajoneuvoliikenteen tunnelissa mitoittava tekijä. Ajoneuvoliikenteen mitoittamiseen voidaan tarvittaessa soveltaa samaa mitoittamisperiaatetta kuin raideliikenteen.

7.2 Raideliikenne

Raideliikenne aiheuttaa kiskojen välityksellä maaperään tai kallioon kytkeytyvää tärinää. Akselipainon lisäksi värähtelyä aiheuttavat kiskon epätasaisuudet (korrugaatio), pyörän epätasaisuudet, kaarrekirskunta, kiskovaihteet, metrojunan laitteisto, kiihdyttäminen sekä jarruttaminen. Yleensä kallionvaraisten ratojen mitatut tärinätasot ovat hyvin sallittujen ra-

¹¹ Helmut Haas määrittä tämän ilmiön 1949 väitöskirjassaan Über den Einfluss eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache

ja-arvojen puitteissa, mutta runkoääni voi olla ongelma. Runkomelu voidaan torjua asentamalla vaimennus ratarakenteisiin.

7.3 Räjäytykset

Kalliotunnelit rakennetaan yleensä räjäyttämällä (poraus-räjäytys –louhinta), joten maanalaiset räjäytyshaitat ovat tyypillisiä uusien tunnelien yhteydessä. Myös parkkitalot, väestönsuojat, monitoimihallit ja muut maanalaiset tilat aiheuttavat väistämättä tärinöitä. Räjäytystöiden aiheuttama värähtelyspektri eroaa huomattavasti liikenteen aiheuttamasta spektristä. Värähtelyn nopeuteen ja amplitudiin voidaan vaikuttaa räjähteen valinnalla ja rajoittamalla hetkellistä (momentaanista) räjähdysainemäärää. Räjäytysten mitoituskriteerinä toimii rakennusten vaurioituminen, joten siihen ei voida soveltaa samaa mitoitusperiaatetta kuin ajoneuvoliikenteeseen tai raideliikenteeseen.

8 VAATIMUSTASO

8.1 Lakiin perustuvat vaatimukset

Maankäyttö- ja rakennuslaki (5.2.1999/132) asettaa viihtyvyyden yhdeksi suunnittelun tavoitteista (5 §). Se myös edellyttää, että kaava perustuu riittäviin tutkimuksiin ja selvityksiin mm. ympäristövaikutuksista (9 §). Maankäyttö- ja rakennusasetuksessa (10.9.1999/895) edellytetään selvittämään merkittävät ja välilliset vaikutukset ihmisten elinoloihin ja ympäristöön (1 §). Rakennus ei saa aiheuttaa lähellä oleville vaaraa terveydelle ja sen pitää mahdollistaa nukkuminen, lepääminen ja työskenteleminen hyväksyttävissä olosuhteissa (50 §). Suomen rakentamismääräyskokoelman pohjarakenteita koskevassa osassa (SRMK B3: 2004) määrätään, että liikennetärinä on selvitettävä ja se ei saa aiheuttaa vauriota rakennukselle eikä kohtuutonta häiriötä rakennuksessa oleville ihmisille. Opastavana aineistona viitataan Suomen Rakennusinsinöörien liiton kirjaan RIL 121 (2004), jossa annetaan heilahdusnopeuden huippuarvoksi noin 1 mm/s ja suositellaan runkomelun enimmäisarvoksi 35 dBA.

Meluntorjuntalaki (382/1987) käsittelee viihtyisyyttä merkittävästi vähentävää ääntä, runkomelua ja tärinää meluna (2 §). Valtioneuvosto on päätöksellä (993/1992) antanut melulle ohjearvot päivällä ja yöllä, sisällä sekä ulkona (2 §, 3 § ja 4 §). Päätöksen arvot on esitetty

taulukossa 7. Valtioneuvoston päätöstä sovelletaan meluhaittojen ehkäisemiseksi ja ympäristön viihtyvyyden turvaamiseksi liikenteen ja rakentamisen suunnittelussa (1 §).

Ympäristönsuojelulaissa (4.2.2000/86) veloitetaan toiminnanharjoittaja olemaan selvillä toimintansa ympäristövaikutuksista sekä keinoista vähentää niitä (5 §). Tätä pykälää sovelletaan myös raideliikenteen järjestäjään (HE 170/2003). Laki ympäristövahinkojen korvaamisesta (19.8.1994/737) määrää, että vahinko on korvattava, ellei häiriön sietämistä voida pitää kohtuullisena (4 §). Puutteellista rakentamista tai rakennuksen ikää voidaan käyttää perusteena korvauspäätöksen hylkäämiselle tai alentamiselle. On suositeltavaa suorittaa katselmuksia ennen rakentamista ja tarvittaessa jälkikäteen aiheutetun haitan toteamiseksi. (Leppänen 2006)

8.2 Taloudellisuusvaatimukset

Tunnelihankkeissa suurin osa kustannuksista on sidottu rakennusaikaan, joten on ensiarvoisen tärkeää, että tärinänvaimennus aiheuttaa mahdollisimman vähän ylimääräisiä työvaiheita rakentamisprosessiin. Hankkeen kokonaiskustannuksista tärinänvaimennus edustaa marginaalista osaa, mutta koska kyseessä on suuri summa, maksaa hyvin tehty vaimennussuunnittelu itsensä takaisin. Lisäksi parantunut tarkkuus vähentää hankkeesta aiheutuvia valituksia ja sitä voidaan siten pitää laatua parantavana tekijänä.

Tärinänvaimennuksen asentaminen jälkikäteen on työlästä ja erittäin kallista, joten tärinänvaimennuksen epäonnistuminen on taloudellisesti merkittävä riski. Jos mitoitus tehdään stokastisia menetelmiä hyödyntäen, suosittelen¹² mitoituksen epäonnistumisen riskitasoksi 50 vuoden aikana 10^{-4} eli 0,01 %. Mikäli tärinänvaimennuksen mitoittaminen johtaa halvempiin seuraamuksiin (lunastukset, kompensatiot, korjaukset jne.) voidaan käyttää korkeampaa riskitasoa¹³ 10^{-3} eli 0,1 %. Kun mitoituksen epäonnistumisesta aiheutuvat kustannukset tunnetaan, voidaan lisäinvestoinnin hinta laskea toteutumistodennäköisyyksien perusteella. Toteutumistodennäköisyyttä pienennetään lisäinvestoinneilla kunnes pienentämiskustannukset ovat samat epäonnistumiskustannusten ja epäonnistumistodennäköisyyden

¹² suosittelu perustuu ISO Dp 10252, AASHTO, IABSE antamiin viitearvoihin sekä riskin luonteeseen (ei henkilövahinkoja eikä ihmisuhreja, mutta merkittävät taloudelliset kustannusvaikutukset). Suositus on noin viisi kertaa epätodennäköisempi kuin Eurocode SFS-EN 1990:n määrittelemä luotettavuusluokka RC1 50 vuodelle $P(\beta = 3,3) = 0,000483424 \approx 0,048\%$.

¹³ Suositus on kaksi kertaa todennäköisempi kuin RC1 50 vuodelle.

kanssa. Usein lisäinvestointeja ei voida tehdä liukuvasti, vaan on valittava jokin tietty taso (esim. jokin tietty eristepaksuus) ja siihen liittyvä riskitaso.

On kannattavaa suorittaa katselmuksia alueelta etukäteen, koska haitan kohtuullisuuden osoittamisvelvollisuutta ei ole lainsäädännössä yksiselitteisesti määrätty. Mikäli katselmuksia ei ole tehty, oikeus voi katsoa rakentajan vaikeuttaneen kohtuullisuuden toteamista. (esim. Turun maaoikeus, Dnro M 02/10, 25.10.2002). Myös työnaikaisia mittauksia ja koe-räjäytyksiä on järkevää hyödyntää tärinähaitan arviointiin etukäteen.

8.3 Toteutettavuusvaatimukset

Vaikka tärinänvaimennus olisi juridiset vaatimukset täyttävää ja taloudellista, se pitää pysyä toteuttamaan myös teknisesti. Teknistä toteutusta rajoittavat materiaalien saatavuus, asennus- ja säilyvyysvaatimukset sekä mekaaniset vaatimukset. Saatavuusvaatimus on helppo selvittää toimittajan kanssa ja on osittain myös taloudellinen kysymys. Asennusvaatimuksiin liittyvät käytettävät ainepaksuudet ja -dimensiot sekä materiaalikerrosten rajakerrokset. Tärinänvaimennus ei toimi tai toimii erittäin huonosti, jos se asennetaan väärin (sallitaan tärinäsiltojen syntyminen vaimennuskerroksen ohi). Jo pienikin tärinäsillan syntyminen vähentää tärinänvaimennuksen vaimennuskykyä oleellisesti. Asennuksen tekninen toteutus vaikuttaa kustannuksiin voimakkaasti, koska asennusnopeus on yksi kustannustekijä. Säilyvyys taas vaikuttaa huoltoväliin ja käyttöikään. Taloudellisesti järkevää on saavuttaa vähintään radan tukirakenteiden käyttöikävaatimus, jolloin vaimennuksen kunto ja korvaus-tarve voidaan arvioida yhtä aikaa radan kunnan kanssa. Vertailtaessa tärinänvaimennuksen toteutusvaihtoehtoja yhtenä tekijänä kannattaa pitää elinkaarikustannuksia normeerattuna esim. 100 vuodelle. Näin tärinänvaimennuksen piilokustannukset tulevat huomioiduksi.

Mekaanisista vaatimuksista tärkein on ratarakenteen painumavaatimuksien täyttäminen. RATO3 asettaa (staattiseksi) ratarakenteen painumarajaksi kovalla maapohjalla 1 mm – 3 mm. Kallioperustaisille ratarakenteille ei ole annettu ohjetta, mutta ratarakenteen dynaaminen painuma ei voi kasvaa kovin suureksi tai matkustusmukavuus kärsii. Lisäksi tärinänvaimennuksen on kyettävä säilyttämään riittävä vaimennusominaisuus kuormitusy-
lien toistuessa. Tämä voidaan testata vaimennusmateriaalin valmistajan toimesta kuormi-
tuksen toistokokeella. Yleensä materiaalin tulee olla joko vedenpitävää tai sen tulee toimia
myös vedellä kyllästettynä. Jälkimmäisessä tapauksessa rakenteen jäätyminen tulee estää.

Mikäli materiaali ei toimi vedellä kyllästettynä, ei sen käyttö (esim. vesieristeen kanssa) ole vesivuotojen sekä jäätymisvaaran takia suositeltavaa.

9 MITOITUSKÄYTÄNTÖ

9.1 Mitoittamisen yleiset periaatteet

Värähtelyyn liittyen on yleensä¹⁴ tarkistettava kolmen eri mitoitus ehdon täytyminen: suora ilmaääni (melu), ihmiseen välittyvä värähtely (tärinä) sekä ihmisen kuulema rakenteista säteilevä ääni (runkoääni). Vaikka nämä osa-alueet ovat kaikki peräisin samasta värähtelylähteestä, eroaa niiden havaitseminen merkittävästi toisistaan. Näin ollen kukin niistä mitoitetaan eri tavalla. Tässä työssä keskitytään tärinän ja runkoäänen mitoittamiseen, koska ne ovat oleellisessa asemassa kalliotunneliin sijoitetuissa ratarakenteissa.

Tärinän ja runkoäänen ennustaminen on hyvin samantapaista. Toisessa pyrkimys on johtaa rakenteen (yleensä lattia tai seinä) värähtely ja toisessa jatketaan rakenteen värähtelystä vielä ilmassa värähtelyyn ja siten kuultavaksi ääneksi. Runkoäänen mitoittamisen voi nähdä jatkumona tärinän mitoittamiselle.

Värähtelyn etenemistä lähteestä rakenteeseen ja rakenteesta ihmisen kuulemaksi ilmaääneksi (runkomeluksi) on vaikea mallintaa riittävän tarkasti. Tämän vuoksi on suositeltavaa käyttää viitteellisiä (implisiittisiä) ja tilastollisia (stokastisia) lähestymistapoja. Kun ilmaääninen odotettavissa olevan äänenpainetason suuruusluokka on selvillä, pyritään sitä rajoittamaan ensin syntylähteessä, sitten kulkureitillä ja vasta viimeisenä keinona¹⁵ havaitsijan luona. Suunnittelutehtävänä on määrittää riittävä syöttöhäviö (engl. *insertion loss*), joka takaa runkoäänen pysymisen raja-arvojen alapuolella.

Vaimennustarpeen mitoittaminen runkomelun osalta voidaan tehdä laskemalla odotetut runkomelun äänitasot eri etäisyyksillä kalliotunnelista. Odotetun äänitason ja tavoitetason erotuksena saadaan tarvittava ratarakenteiden vaimennuskyky eli syöttöhäviö. Laskennalliseen odotusarvoon liittyy paljon epävarmuustekijöitä, johtuen pääasiassa kallion ja maape-

¹⁴ joissain erikoistilanteissa rakenteiden vaurioituminen tai laitteiden, koneiden tai operaatioiden häiriintyminen tulee myös tarkistaa.

¹⁵ poikkeuksena ovat huipputarkat laitteet (esim. mittalaitteet mikro- ja nanometritasolla)

rän geometrioiden ja mekaanisten ominaisuuksien vaihtelusta. Herätteinä voidaan käyttää vastaavissa kohteissa mitattuja tärinäspektrejä.

Yleisin vaimennuksen toteutustapa on tärinänvaimennusmatto (engl. *ballast mat*), joka sijoitetaan kallioperän ja radan kuormia jakavan sepelin väliin. Vaimennusmattoja voidaan sijoittaa myös kiskon alle, kiskon kiinnityslevyn alle, ratapalkin alle tai mahdollisen rata-kaukalon alle. Itse kiskoon sijoitettava vaimennin ei ole osoittautunut riittävän tehokkaaksi (Hanski 2004 ja Wu 2007). Vaimennuksessa värähtelevän kappaleen massa on eduksi, joten tärinänvaimennusmatto on tehokkain tapa vaimentaa tärinää. Se tuo kuitenkin ylimääräisen työvaiheen hankkeeseen, jossa tyypillisesti 60...70 % kustannuksista on sidottu rakennusaikaan. Ratapalkin alle sijoitettava vaimennusmatto asennetaan jo elementtitehtaalla, joten se ei hidasta asennustyötä ollenkaan.

Raidepohjaisen liikenteen osalta mitoituskriteeri on sekä tärinän että runkomelun osalta asumisviihtyvyys (olematon tai vähäinen haitta). Raideliikenteen tärinät eivät pääsääntöisesti aiheuta rakenteita vaurioittavaa tärinää (Huhtala 2006). Erityisen herkässä kohteessa, jossa ei asu ihmisiä (esim. historialliset rauniot) voi olla tarpeen tarkistaa myös rakenteen vaurioitumiskriteeri. Erikseen on tarkistettava myös erikoisherkkien laitteiden (esim. suuren tarkkuuden mittalaitteet) tai tarkkuutta vaativien toimintojen (esim. kirurgia tai hienomekaanisten laitteiden valmistus) vaatimukset tärinän suhteen.

9.2 Mitoittamisen nykytilanne

9.2.1 Nykytilanne Suomessa

Lakiin perustuvien raja-arvovaatimusten puuttuessa mitoitus Suomessa on aiemmin perustunut empiiriseen tietoon ja nykyään VTT:n asettamiin suositusarvoihin, jotka ovat identtiset Norjalaisen standardin NS 8176 kanssa. VTT:n suositusarvot tärinälle on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. VTT:n suosittelemat raja-arvot (Talja 2004, taulukko 1)

Raja-arvo	Luokka A	Luokka B	Luokka C	Luokka D
	Hyvät asuinolosuhteet.	Suhteellisen hyvät olosuhteet.	Suositus uusien rakennusten ja väylien suunnittelussa.	Olosuhteet, joihin pyritään vanhoilla asuinalueilla.
	<i>Ihmiset eivät yleensä havaitse värähtelyjä</i>	<i>Ihmiset voivat havaita värähtelyt, mutta ne eivät ole häiritseviä.</i>	<i>Keskimäärin 15 % asukkaista pitää värähtelyjä häiritsevinä ja voi valittaa häiriöstä.</i>	<i>Keskimäärin 25 % asukkaista pitää värähtelyjä häiritsevinä ja voi valittaa häiriöstä.</i>
$v_{w,95} \left[\frac{mm}{s} \right]$	0,10	0,15	0,30	0,60

Vuoden 2004 pohjarakennusohjeissa (RIL 121-2004) suositellaan runkomelun A-painotetuksi enimmäisarvoksi 35 dB. Joidenkin suomalaisten asiantuntijoiden mukaan kalliitunneleiden runkomelun kohdalla voi olla järkevää käyttää alempaa raja-arvoa 30 dB, mikä on lähempänä Ruotsin ja Norjan vaatimaa tasoa. (Peltonen et al. 2005) Sosiaali- ja Terveysministeriö on asettanut asumisterveysohjeessaan taulukossa 6 esitetyt raja-arvot runkoäänelle terssikaistoittain (taajuusalue 10 Hz ... 200 Hz). Päivällä voidaan käyttää 5 dB korkeampia arvoja.

Taulukko 6. Sosiaali- ja terveysministeriön raja-arvot (STM 2003:1, taulukko 3)

Raja-arvo	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
[Hz]											
$L_{Aeq,1h} [dB]$ re 20 μPa	74	64	56	49	44	42	40	38	36	34	32

Meluntorjuntalakiin (382/1987) perustuen Valtioneuvosto on päätöksellä 993/1992 antanut taulukon 7 ohjearvot melulle¹⁶. Kapeakaistainen tai iskumainen melu huomioidaan lisäämällä mittaustulokseen 5 dB.

Taulukko 7. Valtioneuvoston ohjearvot (993/1992)

Raja-arvo	päivä (07-22)		yö (07-22)	
	sisällä	ulkona	sisällä	ulkona
$L_{Aeq} [dB]$ re 20 μPa	35	55	30	45

¹⁶ melulla tarkoitetaan Meluntorjuntalain 382/1987 mukaan terveydelle haitallista, ympäristön viihtyisyyttä merkityksellisesti vähentävää tai työntekoa merkityksellisesti haittaavaa ääntä taikka siihen rinnastettavaa tärinää.

9.2.2 Nykytilanne tärinän osalta kansainvälisesti

! Tässä työssä tärinää on tarkasteltu raidepohjaisen liikenteen näkökulmasta. Seuraavaksi esitetyjä taulukoita ei saa soveltaa muiden tärinälähteiden mitoittamiseen, ellei toisin erikseen mainita.

Norjan standardi NS 8176 luokittelee rakennukset neljään haittaluokkaan ja antaa niiden värähtelyn painotetulle kiihtyvyydelle ja nopeudelle taulukon 8 mukaiset raja-arvot. Tarkasteltava taajuusalue on 0,5 Hz – 160 Hz. Luokkaa C suositellaan raja-arvoksi uusille asuinalueille ja uusien liikenneväylien suunnittelussa. Luokka D vastaa tasoa, johon tulisi päästä olemassa olevilla asuinalueilla, ellei luokkaa C voida saavuttaa taloudellisesti tehokkaalla tavalla. Suomessa VTT:n erikoistutkija Asko Talja on suositellut samojen rajojen käyttöönottoa ja ehdottaa tarkastelujakson pituudeksi yhtä viikkoa. (Talja, 2004 ja Törnqvist & Talja, 2006). Timo Huhtala on diplomityössään ehdottanut, että myös lyhyempää ajanjaksoa voitaisiin käyttää, jos mittaaaja on itse paikalla ja mitoittava ajanjakso tunnetaan etukäteen. Huhtalan mukaan hyvä approksimaatio viikon tunnusluvusta saadaan mittaamalla arkipäivien tunnusluku. (Huhtala, 2006) Lisäksi Huhtalan tulosten perusteella hyvä tai varmalla puolella oleva arvio tärinän tunnusluvusta saadaan myös korottamalla arkipäivältä mitattuja tuloksia (tehollisarvo) 25 %.

Taulukko 8. Standardin NS 8176 haittaluokat ja raja-arvot (NS 8176, 2005, taulukko B.1)

Raja-arvo	Luokka A	Luokka B	Luokka C	Luokka D
	Henkilöt eivät yleensä huomaa värähtelyä	10 % henkilöistä kokee värähtelyn häiritseväenä	15 % henkilöistä kokee värähtelyn häiritseväenä	25 % henkilöistä kokee värähtelyn häiritseväenä
$v_{w,95} \left[\frac{mm}{s} \right]$	0,1	0,15	0,3	0,6
$a_{w,95} \left[\frac{mm}{s^2} \right]$	3,6	5,4	11	21

Ruotsin normi SS 460 48 61 kattaa taajuusalueen 1 Hz – 80 Hz ja antaa raja-arvot taajuusalueessa (engl. *frequency domain*). Normi perustuu standardin ISO 2631-1 (1978) havaitsemiskynnyksen kohtuulliseen ylittämiseen. Taulukossa 9 on esitetty RMS-painotetulle no-

peudelle ja kiihtyvyydelle taajuuskohtaiset alemmat raja-arvot, kun häitää voidaan pitää kohtuullisena.

Taulukko 9. Standardin SS 460 48 61 alemmat raja-arvot (SS 460 48 61, 1992, s. 7)

Taajuus [Hz]	v_{rms} $\left[\frac{mm}{s}\right]$	a_{rms} $\left[\frac{mm}{s^2}\right]$
1	2,292	14,40
1,25	1,832	14,40
1,60	1,432	14,40
2	1,148	14,40
2,5	0,948	14,88
3,15	0,780	15,48
4	0,648	16,28
5	0,544	17,20
6,3	0,464	18,40
8	0,398	20,00
10	0,398	25,20
12,5	0,398	31,20
16	0,398	40,00
20	0,398	50,00
25	0,398	62,40
31,5	0,398	78,80
40	0,398	100,00
50	0,398	125,20
63	0,398	157,60
80	0,398	200,00

Ruotsin rautatiehallinto (ruots. *Banverket*) on antanut omat suosituksensa tärinän enimmäis-tasoista (taajuusalueella 1 – 80 Hz), jotka on esitetty taulukossa 10. Suurin sallittu nopeu-den arvo on esitetty suluissa.

Taulukko 10. Suositellut tärinärajat (Banverket 2006)

Raja-arvo	Uudet asuinalueet	Peruskorjattavat rata-alueet	Vanhat rata- ja asuinalueet
$v_{rms} \left[\frac{mm}{s}\right]$	0,4 (0,7)	0,4 (1,0)	1,0 (2,5)
$a_{rms} \left[\frac{mm}{s^2}\right]$	14	14	36

Tanskan Ympäristö ja energiaministeriön (tansk. *Miljøstyrelsen*) ohje antaa erilliset rajat tärinätasolle, nopeudelle sekä kiihtyvyydelle riippuen rakennuksen käyttötavasta. Raja-arvot on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Miljøstyrelsen antamat raja-arvot (Miljøstyrelsen 9/1997, s. 37)

Raja-arvo	Asunto, ilta ja yö (18 – 07)	Asunto, päivä (07-18)	Luokkahuone, toimisto tms.	Muut huoneet yrityksissä
Tärinätaso $L_{aw} [dB]$ re 10^{-6} m/s^2	75	75	80	85
Nopeus $v_w \left[\frac{mm}{s} \right]$	0,16	0,16	0,30	0,50
Kiihtyvyys $a_w \left[\frac{mm}{s^2} \right]$	5,6	5,6	10,0	17,8

Saksan normi käsittelee taajuusaluetta 1 Hz – 80 Hz. Se käyttää tunnuslukuna dimensioton-ta arvoa KB_F , jonka se mainitsee yli 10 Hz taajuuksilla vastaavan RMS-painotettua heilahdusnopeuden tehollisarvoa. Maanpäälliselle kiskoliikenteelle raja-arvot voidaan kertoa luvulla 1,5. Raja-arvot on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. DIN 4150-2:n mukaiset raja-arvot jatkuvalle haitalle (DIN 4150-2 1999)

Raja-arvo	päivä (06–22)			yö (22–06)		
	A_u $KB_{F \max}$	A_0 $KB_{F \max}$	A_r KB_{FTr}	A_u $KB_{F \max}$	A_0 $KB_{F \max}$	A_r KB_{FTr}
Teollisuusalueet	0,4	6	0,2	0,3	0,6	0,15
Pääasiallisen teollisuusalueen rakennukset	0,3	6	0,15	0,2	0,4	0,1
Alueet, jotka eivät ole pääasiallisia asuin- tai teollisuusalueita	0,2	5	0,1	0,15	0,3	0,07
Asuinalueet ja pääasialliset asuinalueet	0,15	3	0,07	0,1	0,2	0,05
Rakennukset suojelluilla alueilla (sairaalat, parantolat jne.)	0,1	3	0,05	0,1	0,15	0,05

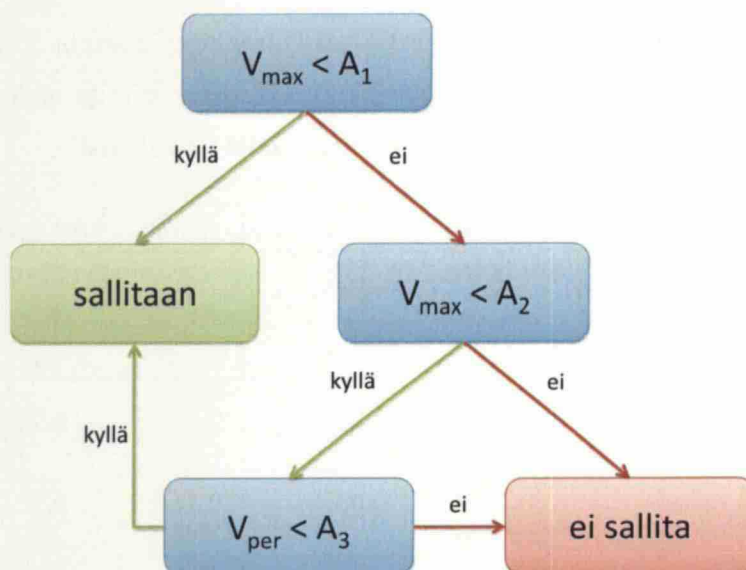
Hollannin normi perustuu Saksan normiin DIN 4150-2 (taajuusalue 1 Hz – 80 Hz) ja sen raja-arvoon vaikuttaa havaitsijan tyyppi (henkilö, rakennus tai laite) sekä häiriön kesto ja

laatu. Joissakin lähteissä on virheellisesti tulkittu normin mitoitusehdoksi $A_3 < A_1 \leq A_2$ (Kaaresoja 2007 ja RHK A 6 2007). Oikaistut mitoitusehdot sekä korjattu vuokaavio on esitetty taulukkona 13 ja kuvana 5 jatkuvalle tärinähaitalle.

Taulukko 13. SBR:n normin mukaiset raja-arvot jatkuvalle haitalle (SBR 2006, s. 24)

Raja-arvo	päivä (07–19) ja ilta (19–23)			yö (23–07)		
	A_1 (V_{\max})	A_2 (V_{\max})	A_3 (V_{per})	A_1 (V_{\max})	A_2 (V_{\max})	A_3 (V_{per})
Terveysten- hoito	0,1	0,4	0,05	0,1	0,2	0,05
Asunnot	0,1	0,4	0,05	0,1	0,2	0,05
Virastot ja konttorit	0,15	0,6	0,07	0,15	0,6	0,07
Kokoustilat	0,15	0,6	0,07	0,15	0,6	0,07
Kriittiset työtilat	0,1	0,1	-	0,1	0,1	-

Raja-arvona V_{\max} voidaan käyttää 30 sekunnin suurinta tehollista arvoa (nopeus tai nopeudeksi muunnettu kiihtyvyys) tai tilastollisesti määritettyä huippuarvoa (enintään 15 mittauksesta). Arvona V_{per} käytetään 30 sekunnin mittausjaksojen neliöllistä keskiarvoa. Koko mittausjakson pituus suhteessa vertailujaksoon huomioidaan pienennyskertoimella. Kun $V_{\max} < A_1$ tai $V_{\max} < A_2 \wedge V_{\text{per}} < A_3$, on tärinä hyväksyttävissä rajoissa. Kuvassa 5 on esitetty sama vuokaaviona.



Kuva 5. Vuokaavio raja-arvojen täyttymisestä (SBR 2006, s. 24)

Sveitsin normi, jonka kriteerinä on rakenteiden vaurioituminen, jakaa taajuusalueen kolmeen osaan: 8 – 30 Hz, 30 – 60 Hz ja 60 – 150 Hz. Normi antaa heilahdusnopeudelle sallittuja arvoja riippuen haitan toistuvuudesta. Taulukossa 14 on esitetty raja-arvot herkkyyssluokalle normaali. Herkille kohteille (mm. kipsi- ja kevytbetonitalot sekä uudisrakenteet ja peruskorjatut talot) suositusarvo on 50 % ... 100 % normaalin herkkyyssluokan arvosta.

Taulukko 14. SN 6040 312a mukaiset raja-arvot (SN 640 312a, 1992)

Raja-arvo		harvinainen häiriö	toistuva häiriö	jatkuva häiriö
< 30 Hz	$v_w \left[\frac{mm}{s} \right]$	15	6	3
30 – 60 Hz	$v_w \left[\frac{mm}{s} \right]$	20	8	4
> 60 Hz	$v_w \left[\frac{mm}{s} \right]$	30	12	6

USA:n liittovaltioiden liikennehallinto FTA on julkaissut standardiin ANSI S3.29 (1983) perustuvat suositukset. Suositukset on muunnettu tässä esityksessä SI-yksiköihin ja esitetty taulukossa 15. Erikoiskohteille (konserttitalit, TV-studiot, auditoriot jne.) on annettu omat suositusarvonsa erikseen.

Taulukko 15. FTA:n mukaiset raja-arvot tärinälle (FTA 2006, taulukko 8-1)

Raja-arvo	painotetulle tärinän tehollisarvolle $[mm/s]$			runkomelulle $[dBA]$ re 20 μPa		
	jatkuva	ajoittainen	epäsäänn.	jatkuva	ajoittainen	epäsäänn.
	>70 krt/pv	30-70 krt/pv	<30 krt/pv	>70 krt/pv	30-70 krt/pv	<30 krt/pv
Kategoria 1: Rakennukset joissa tärinä häiritsee toi- mintoja	0,045	0,045	0,045			
Kategoria 2: Asunnot ja raken- nukset joissa ihmiset yleensä nukkuvat	0,10	0,14	0,25	35	38	43
Kategoria 3: Institutionaaliset alueet, joita käyte- tään pääasiassa päi- väsaikaan	0,14	0,20	0,36	40	43	48

Kirjoitushetkellä (kesä 2008) Eurokoodi ei anna suoria laskenta- tai mitoitusohjeita kallio-
tunneleista kantautuville tärinöille. Eurokoodi EN 1990 edellyttää tyydyttävien värähtely-
ominaisuuksien saavuttamista käyttäjän mukavuuden sekä rakenteen ja rakenneosien toimi-
vuuden kannalta. Lisäohjeita varten se viittaa edelleen Eurokoodeihin EN 1991-1-1, EN
1991-1-4 sekä ISO-standardiin ISO 10137. (EN 1990 2002) Näistä ISO 10137 sisältää viit-
taukset standardeihin ISO 2631-1 ja ISO 2631-2 sekä antaa esimerkkejä värähtelyrajoista ja
tavoista vaimentaa värähtelyä.

9.2.3 Nykytilanne runkomelun osalta kansainvälisesti

! Tässä työssä runkomelua on tarkasteltu raidepohjaisen liikenteen näkökulmasta. Seu-
raavaksi esitettyjä taulukoita ei saa soveltaa muiden melulähteiden mitoittamiseen,
ellei toisin erikseen mainita.

Tanskan Ympäristö ja energiaministeriön (tansk. *Miljøstyrelsen*) ohje antaa erilliset rajat
infraäänen ja runkoäänen paineelle riippuen rakennuksen käyttötavasta. Ohjeissa runkoää-
nen taajuusalueeksi on määritelty 10 – 160 Hz. Impulssimainen ääni laskee raja-arvoja
5 dB. Raja-arvot on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16. Miljøstyrelsen antamat raja-arvot (Miljøstyrelsen 9/1997, s. 13)

Raja-arvo	Asunto, ilta ja yö (18 – 07)	Asunto, päivä (07-18)	Luokkahuone, toimisto tms.	Muut huoneet yrityksissä
Infraääni (< 20 Hz) L_{pG} [dB]	85	85	85	85
Runkoääni (10 – 160 Hz) $L_{pA,LF}$ [dB]	20	25	30	35

Ruotsin sosiaalivirasto (ruots. *Socialstyrelsen*) on julkaissut suosituksen sallituista äänenpainetasoista taajuusalueella 31,5 – 200 Hz. Nämä suositukset on esitetty taulukossa 17.

Taulukko 17. Sallitut äänenpainetasot (Socialstyrelsen 1994)

Taajuus [Hz]	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
$L_{pA,LF}$ [dB]	56	49	43	41,5	40	38	36	34	32

Iso-Britannian ympäristöministeriö DEFRA ehdottaa runkomelun mitoitustavaksi parannettua Ruotsalaista menetelmää. Siinä taajuusaluetta on laajennettu alaspäin 10 Hz asti (10 Hz – 160 Hz) ja yksinkertaiset keinot häiriöajankohdalle ja häiriölaadulle annetaan (jos häiriö tapahtuu vain päiväsaikaan tai äänilähde on tasalaatuinen, voidaan arvoja korottaa 5 dB). Taulukossa 18 on esitetty ohjeen mukaiset rajat.

Taulukko 18. Iso-Britannian mitoitusehdotus (DEFRA 2005, sivu 64)

Raja-arvo [Hz]	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160
L_{Aeq} [dB]	92	87	83	74	64	56	49	43	42	40	38	36	34

Normiehdotukseen liittyen DEFRA on suorittanut laajat kirjallisuustutkimukset ja myös omia täydentäviä tutkimuksiaan. Vaikuttaa siltä, että DEFRA:n menetelmä ennustaa tällä hetkellä parhaiten runkoäänten häiritsevyyttä. (DEFRA 2003 ja DEFRA 2005)

10 MALLINTAMINEN

10.1 Yleistä

Tärinäperäisten haittojen mitoittaminen voidaan jakaa kolmeen eri mitoitusstyyliin: täysempiirinen, implisiittinen ja teoreettinen. Täysempiirinen mitoittamistapa hyödyntää aiempien vastaavien kohteiden tietoja sekä kohteesta suoritettuja mittauksia. Implisiittisessä mitoittamistavassa pyritään rajoittamaan laskennallisesti ennustettu tärinätaso sellaiseksi, ettei sen ole havaittu aiheuttavan epämiellyttäviä vaikutuksia. Teoreettisessa mitoittamistavassa tärinän koko etenemisreitti ihmisen kuultavaksi runkomeluksi asti mallinnetaan. Seuraavissa kappaleissa käsitellään miten ongelman eri ominaisuuksia mallinnetaan ja millä työkaluilla mallinnusta voi suorittaa.

10.2 Mitoitusohjelmat

Tarkkaan malliin perustuva teoreettinen mitoittaminen voidaan tehdä edistyneellä elementtimenetelmäohjelmalla (soveltuvia menetelmiä ovat esimerkiksi FEM ja BEM). Käytetyn verkon tulee olla riittävän tiheä (FEM-ohjelmassa yhdeksän solmua aallonpituutta kohti) ja käytetyn aika-askeleen riittävän lyhyt (elementin pituus jaettuna aallon etenemisnopeudella). Soveltua ohjelmia ovat ainakin Abaqus, Ansys ja Plaxis. Laskenta-ajan säästämiseksi, ongelma voidaan mallintaa aksisymmetrisenä puoliavaruutena, jolloin laskenta-aika on merkittävästi lyhyempi kuin kolmiulotteisella solidimallilla.

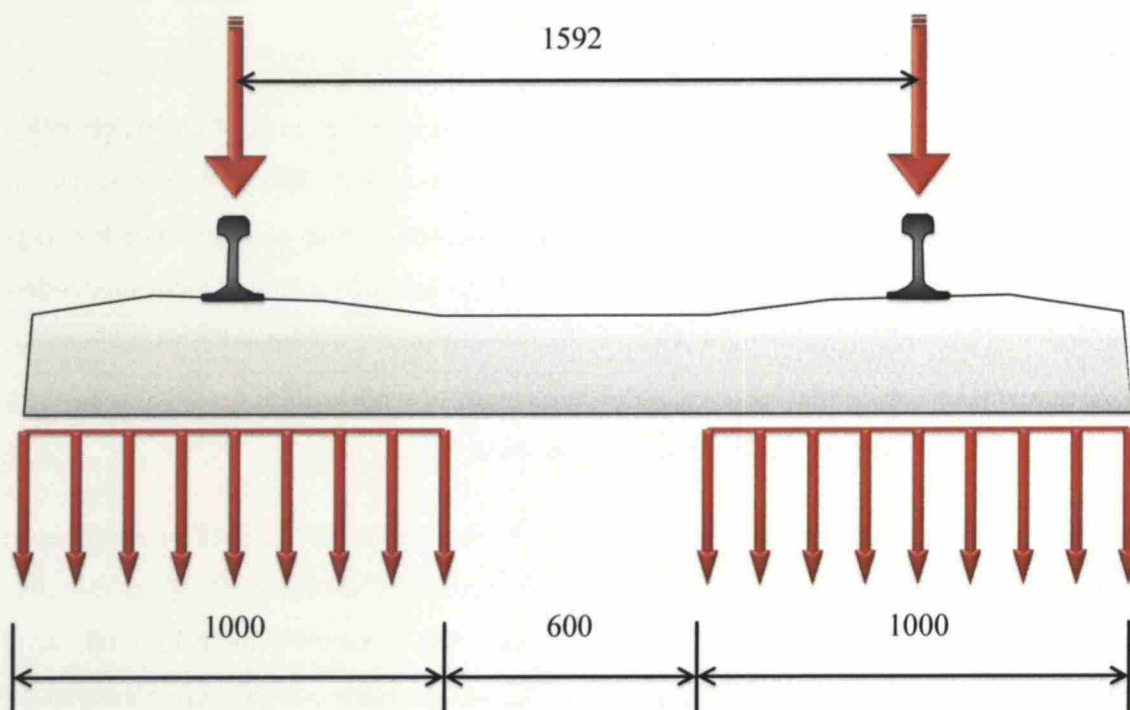
Implisiittisessä mitoittamisessa riittää saada suuruusluokka-arvio tärinästä maanpinnassa. Tämä voidaan määrittää lähes millä tahansa dynaamisella FEM-ohjelmalla. Jopa yksiulotteisella FEM-mallilla saadaan oikea suuruusluokka, kun parametrit on valittu oikein ja geometrinen vaimennus otetaan huomioon. Koska yksinkertaisen mallin laskenta-aika on erittäin lyhyt, voidaan näin tärinähaittaa arvioida koko radan matkalta tarvittavin välein. Menetelmän etuna on sen nopeus ja heikkoutena sen kykenemättömyys huomioda erilaisien rakennusten, maaperien, heijastusten ja vaimennusten vaikutus. Implisiittistä tapaa käytettäessä onkin suositeltavaa mitata tärinät kriittisistä kohteista antureilla tai hyödyntää rakentamisen aikana tehtyjä mittauksia.

Täysempiirisessä tavassa ei tarvita mitään erityisiä mitoitusohjelmia. Laskenta perustuu tunnettuihin aallon etenemisnopeuksiin kalliossa, radan ja havaitsijan etäisyyteen sekä ap-

proksimaatioihin tärinän etenemisestä rakennuksen sisään. Menetelmän etuna on sen helpous ja vaarana sen epätarkkuus (epätaloudellisuus tai epäonnistumisen riski). Jos arvioiden tukena käytetään tärinämittauksia kohteesta, on menetelmä käyttökelpoinen.

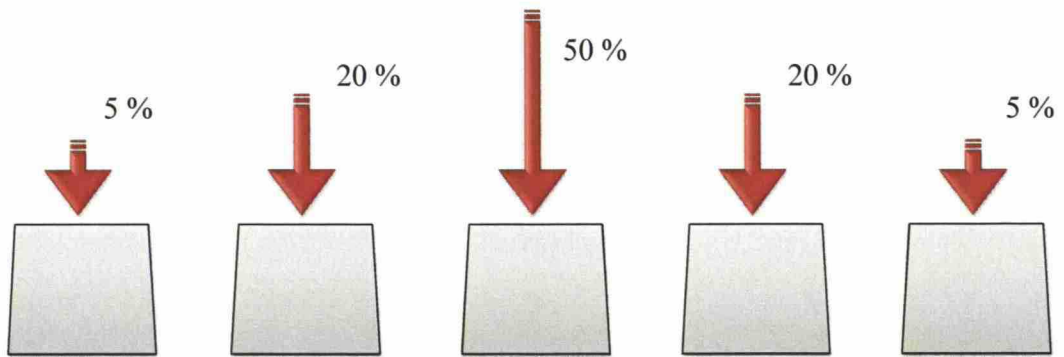
10.3 Kuormien mallintaminen

Kuormien mallintamistapa vaikuttaa aaltotyyppien syntyyn. Runkoaaltojen kannalta viivakuormat synnyttävät S- ja P-aaltoja sekä pistekuormat ainoastaan P-aaltoja. S-aalloilla on enemmän energiaa kuin P-aalloilla, joten niillä saattaa olla merkitystä hitaammasta etenemisnopeudesta huolimatta. Ratapalkin kuormat voidaan esittää kahtena redusoituna ja uudelleenjaettuna viivakuormana (kuva 6). (RATO3 2008)



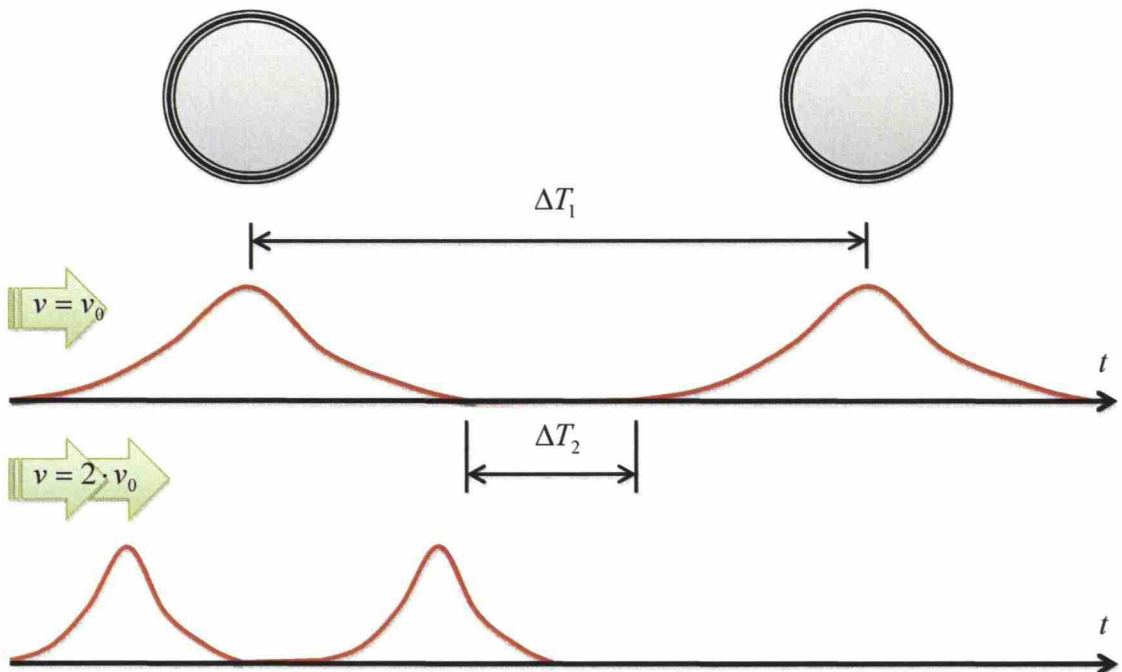
Kuva 6. Kiskoilta tulevan pistekuorman uudelleenjakaminen viivakuormaksi

Ratapölkkyyn tukeutuva kisko jakaa kuormia useammalle ratapölkylle. Jos noudatetaan RHK:n ratateknisten ohjeiden mukaista jakaumaa (kuva 7) voidaan muodostaa herätteelle ajasta riippuva approksimaatio, jonka muoto riippuu junan nopeudesta ja telien sijainnista sekä geometriasta.



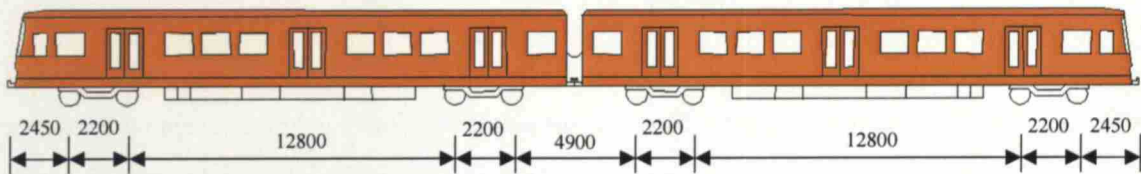
Kuva 7. Kisko jakaa pistekuorman useammalle ratapölkylle.

Kuvassa 8 on esitetty kahden pistekuorman aiheuttama kuormituskuvaaja ajan funktiona, perustuen ratateknisten ohjeiden kuormitusjakaumaan. Kuormia jakavan kerroksen kuormaa tasaavaa vaikutusta ei ole huomioitu. Jos nopeutta kasvatetaan kaksinkertaiseksi, kapenee heräte puolet lyhyemmäksi. On tärkeää huomata, että junan ajonopeus ei vaikuta kuorman amplitudiin. (Bahrekazemi 2004) Junan ajonopeuden kasvaminen kasvattaa rakenteen heilahdusnopeuden arvoa, koska amplitudifunktion kulmakerroin jyrkkenee. (Lombaert et al. 2008)



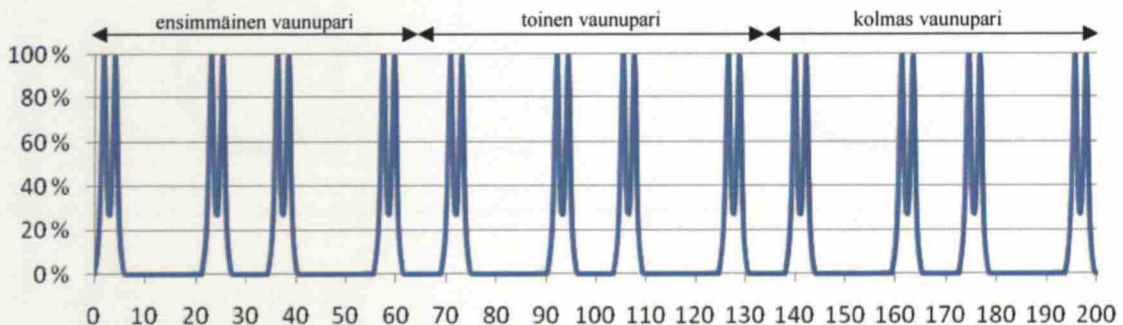
Kuva 8. Metrojunan akselien ratapölkylle aiheuttama piste- tai viivakuorma ajan funktiona

Jos pistekuormat ovat lähekkäin ($\Delta T_2 \leq 0s$), kuormituskuviot osuvat toisiinsa ja summautuvat resultantiksi. Näin voi käydä telijärjestelmissä, joissa pyörät sijaitsevat lähellä toisiinsa. Kuvassa 9 on esitetty metrojunan (HKL, sarja 100) päämitoista johdetut akselien sijainnit. Päämittojen, vaunuparien määrän sekä ajonopeuden perusteella voidaan muodostaa herätefunktio, joka kuvaa metrojunan ylityksestä seuraavaa amplitudin vaihtelua. Funktio kuvaa tilannetta, jossa juna ylittää pistemäisen häiriön (esimerkiksi radan haarautumiskohdan).



Kuva 9. Sarja 100 metrojunan vaunuparin akselien sijainnit (HKL 1999 soveltaen)

Kuvassa 10 on esitetty metrojunan (sarja 100) akselipainon aiheuttaman kuormituksen amplitudin vaihtelu, jossa kuormituskuvioiden summautuminen on nähtävissä. Eron tavalliseen junaan, metrojunassa kaikki akselipainot ovat yhtä suuria (juna on tasapainotettu). Ajasta riippuva kuormitusfunktio voidaan muodostaa, kun metrojunan nopeus tunnetaan. Kuormitusfunktiossa voidaan ottaa myös kiihdyttäminen ja jarruttaminen huomioon, kun kiihtyvyys (hidastuvuus) tunnetaan.



Kuva 10. Yksittäisen ratapölkyn pistekuorman intensiteetti etäisyyden [m] funktiona

10.4 Geometrisen vaimentumisen mallintaminen

Aksisymmetrinen eli pyörähdysymmetrinen malli ottaa geometrisen vaimentumisen automaattisesti huomioon (huomioitu elementin geometrian määrittelyssä). Yksi- ja kaksiulotteisissa malleissa jäykkyyttä ja massaa tulee kasvattaa etäisyyden funktiona siten, että pinta-alan lisäys vastaa tärinän etenemisrintaman kasvua. Tällöin värähtely vaimentuu yhtä

paljon kuin geometrisesti vaimentumalla. Jos vaimentumista ei voida ottaa huomioon mallissa, saadaan arvio yksinkertaisella kertolaskulla. Kun materiaalivaimentuminen on vähäistä, antaa kertolaskukin hyviä tuloksia. Tällöin vaimentuminen lasketaan erikseen ja vaikutus yhdistetään materiaalivaimennukseen kertomalla se geometrisella amplitudikertoimella, joka kuvaa värähtelyn voimakkuutta alkuperäisestä voimakkuudesta.

10.5 Materiaalivaimentumisen mallintaminen

Materiaalin sisäistä vaimennusta, joka perustuu pääasiassa hystereesi-ilmiöön, voidaan mallintaa esimerkiksi Rayleigh-mallilla. Siinä vaimennusmatriisi muodostetaan massa ja jäykkyysmatriisien lineaarikombinaationa. Massamatriisin ja jäykkyysmatriisin kertoimet riippuvat mallinnettavasta materiaalista. Yleensä kalliolle voidaan massamatriisin kertoimeksi valita 0, sillä se vaikuttaa vain hyvin alhaisten taajuuksien vaimennukseen, jotka harvoin muodostuvat merkitseviksi (lisäksi oletus on varmalle puolelle eli kasvattaa tärinää). Hyvälaatuiselle kalliolle on tyypillistä noin 4 % vaimennussuhde (eli vaimennuskertoimen arvo $0,003\text{ m}^{-1}$ matalilla taajuuksilla). Taulukossa 19 on havainnollistettu materiaalivaimennuksen suuruutta arvolla $0,003\text{ m}^{-1}$, kun P-aallon nopeudeksi on otaksuttu 4500 m/s.

Taulukko 19. Materiaalivaimennuksen vaikutus P-aallon huippuarvoon ($\alpha = 0,003\text{ m}^{-1}$)

Matka	0 m	1 m	5 m	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m
$f = 5\text{ Hz}$	100 %	100 %	99,9 %	99,7 %	99,4 %	99,2 %	98,8 %	98,6 %
$f = 50\text{ Hz}$	100 %	99,7 %	98,6 %	97,2 %	94,6 %	92,0 %	89,4 %	87,0 %
$f = 250\text{ Hz}$	100 %	98,6 %	93,3 %	87,0 %	75,6 %	65,8 %	57,2 %	49,8 %
$f = 500\text{ Hz}$	100 %	97,2 %	87,0 %	75,6 %	57,2 %	43,3 %	32,7 %	24,8 %
$f = 1000\text{ Hz}$	100 %	94,6 %	75,6 %	57,2 %	32,7 %	18,7 %	10,7 %	6,1 %

Vaimennuksen suuruus on voimakkaasti riippuvainen taajuudesta. Pitkillä tarkasteluetaajuuksilla voidaan rajoittua tarkastelemaan taajuuksia vain 250 Hz asti. Lasketut arvot edustavat hyvälaatuista kalliota, mutta todelliset parametrit voidaan määrittää esimerkiksi tärinämittauksilla huippuarvojen (PV) suhteen avulla. Heikkolaatuisessa kivessä taajuusriippuvuus korostuu entisestään, koska kallion viat vaimentavat suurempia taajuuksia tehokkaasti. Mikäli materiaalivaimennus jätetään huomioimatta, lisää tehty mallinnusvirhe mitoituksen varmuutta.

10.6 Rakovaimentumisen mallintaminen

Kallion halkeamat ja raot vaimentavat etenkin suuritaajuisia tärinää. Käytännössä korkea-taajuuksinen tärinä vaimenee melko nopeasti sen edetessä kalliomassassa. Vesitäytteiset raot myös katkaisevat S-aaltojen etenemisen kokonaan. Raot aiheuttavat myös energian heijastumista, joka pääsääntöisesti vaimentaa tärinää. Tavallisilla etäisyyksillä yli 250 Hz tärinällä ei ole merkitystä. Erikoistapauksien varalta (lyhyt etäisyys ja/tai vahvistavia heijastuksia) on suositeltavaa mitata taajuuksia aina 500 Hz asti. Erittäin lyhyillä etäisyyksillä mittausaajuus tulee ulottaa jopa 1000 Hz asti, koska materiaalivaimennusta ja rakovaimennusta ei ehdi tapahtua riittävästi taajuusalueen rajoittamiseksi.

Rakovaimentuminen voidaan mallintaa tilastollisesti, todelliseen rakoilutietoon perustuen. Tilastollisessa mallintamistavassa saadaan pinnalla esiintyvälle tärinälle esiintymistodennäköisyys perustuen rakoilun todennäköisyysjakaumaan. Käytännössä tämä on helpointa toteuttaa Monte Carlo –analyysina. Todellinen rakoilu voidaan mallintaa rakoina, esim. FEM-ohjelmaan. Rakopintojen vetolujuutta alennetaan huomattavasti tai se asetetaan nol-laksi tai rakoon voidaan sijoittaa kytkentä jousien tai lyhyiden nivelöityjen sauvojen avulla. Jos rakovaimentuminen jätetään mallintamatta, saadaan mallilla todellisia arvoja suurempia tuloksia. Tämä vie laskennan varmalle puolelle, joten yksinkertaistus voidaan tehdä. Mikäli kyseessä on hyvälaatuinen kallio (suuri puristuslujuus ja enintään kohtalainen rakoilu) tai lyhyt tarkasteluetaisyys, ei tämä oletus tee merkittävää virhettä.

10.7 Täysempiirinen runkomelun etenemismalli

Täysempiirisessä etenemismallissa tärinän eteneminen kohteeseen tunnetaan joko referenssikohteiden tai tärinämittausten perusteella. Tärinää tarkastellaan rakennusten ulkopuolella, maan pinnalla. Kun tärinän nopeustasojen tehollisarvot (S-aikavakiolla) A-painotetaan ja siihen lisätään 15 dB (re 50 nm/s), saadaan runkomelun suuruusluokka-arvio 20 m² kokoiselle tavanomaiselle huoneelle. (Huhtala 2007a, Huhtala 2007b). Kun tärinän mitatut arvot tai referenssikohteiden perusteella otaksutut arvot ovat VTT:n tiedotteen 2278 mukaisia ja runkomelu on STM 2003:1 mukaisia, voidaan mitoitus hyväksyä. Jos arvot ylitetään, saadaan tasojen erotuksesta vaadittu syöttöhäviö tärinänvaimentimille.

Vadillo et al. (1996) esittävät myös muita menetelmiä, kuten

$$L_p = L_v + 10 \log(\sigma) + 10 \log\left(\frac{4S}{A}\right), \quad (20)$$

jossa L_p on äänenpainetaso rakennuksessa (re 20 μPa)
 L_v on pinnan nopeustaso (re 50 nm/s)
 σ on säteilyteho
 S on värähtelevän alueen pinta-ala
 A on huoneen absorptioala

(Vadillo et al. 1996 viitaten Melke 1985)

ja

$$L_p = L_a - 20 \log(f) + 17, \quad (21)$$

jossa L_p on äänenpainetaso rakennuksessa (re 20 μPa)
 L_a on pinnan kiihtyvyytaso (re 10^{-6} m/s²)
 f on värähtelyn taajuus.

(Vadillo et al. 1996 viitaten Remington 1987)

Kuppelwieser & Ziegler (1996) esittävät VIBRA-1 menetelmänä kaavan

$$L_p = L_v + 10 \log(\sigma), \quad (22)$$

jossa L_p on äänenpainetaso rakennuksessa (re 20 μPa)
 L_v on pinnan nopeustaso (re 50 nm/s)
 σ on säteilyteho.

Säteilytermin $10 \log(\sigma)$ vaikutus on noin 5 dB ... 15 dB. (Kuppelwieser & Ziegler 1996 viitaten SBB 1992 ja STUVA 1981)

Myöhemmässä julkaisussa Ziegler (2004) ilmoittaa VIBRA-1 kaavaksi

$$L_p = L_v - A + \sigma, \quad (23)$$

jossa L_p on äänenpainetaso rakennuksessa (re 20 μPa)
 L_v on pinnan nopeustaso (re 50 nm/s)
 A on A-painotus 63 Hz (= 26 dB)
 σ on runkomelun siirtokerroin (5 dB ... 15 dB).

v saadaan kaavalla

$$v = v_0 F_z \left(\frac{G}{G_0} \right)^h F_s \left(\frac{r_0}{r} \right)^m F_a F_e, \quad (24)$$

jossa	v	on RMS-painotettu arvo lattian värähtelylle
	v_0	on värähtelyn referenssiarvo
	F_z	on junatyypin painotuskerroin
	G	on junan keskinopeus
	G_0	on junan referenssinopeus
	h	on eksponentti junan nopeuden skaalaamiseksi
	F_s	on kerroin, jolla otetaan huomioon radan kunto
	r_0	on referenssietäisyys
	r	on rakennuksen ja junaradan keskilinjan välinen etäisyys
	m	on geometrisen vaimennuksen eksponentti
	F_a	on kytkentäkerroin rakennuksen ja maan välillä
	F_e	on tärinän vahvistuskerroin lattialle.

Amerikkalaisten ohjeiden mukaan voidaan käyttää kaavaa

$$L_p = L_v - A, \quad (25)$$

jossa	L_p	on äänenpainetaso rakennuksessa
	L_v	on pinnan nopeustaso (re 25,4 nm/s eli 1 μin/s)
	A	on A-painotus.

(FTA 2006 ja FRA 2005)

Jos tämä muunnetaan SI-yksiköihin, saadaan kaavaksi

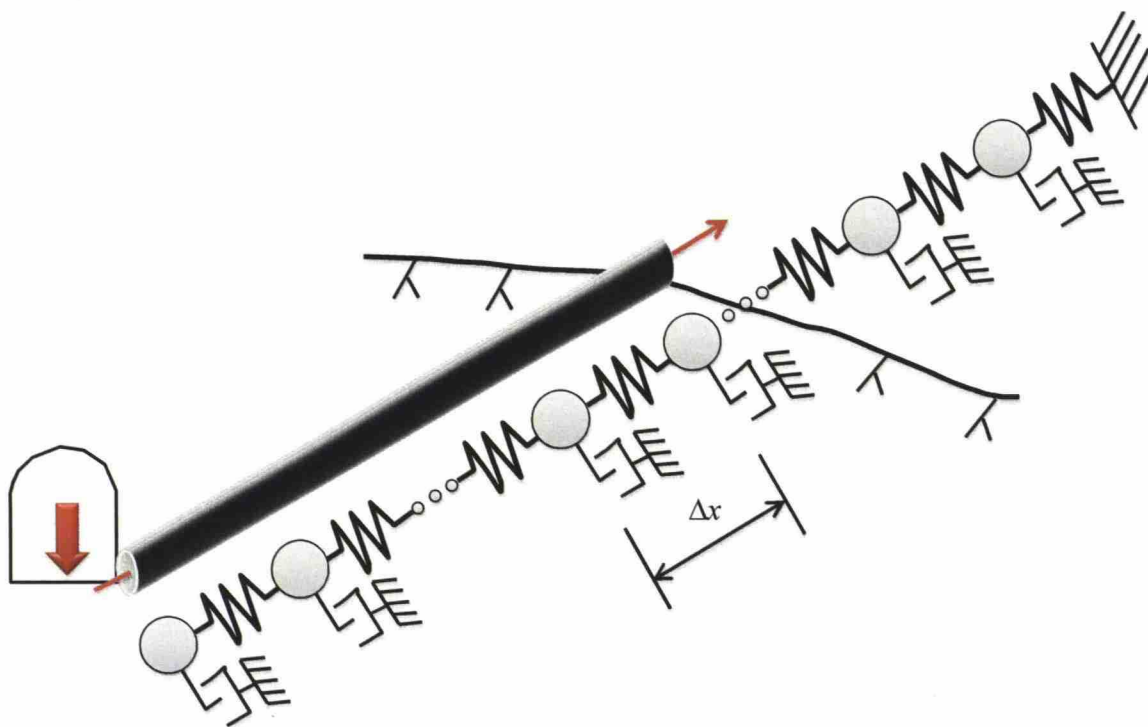
$$L_p = L_v - A + 6dB, \quad (26)$$

jossa	L_p	on äänenpainetaso rakennuksessa
	L_v	on pinnan nopeustaso (re 50 nm/s)
	A	on A-painotus.

Amerikkalaisissa ohjeissa rakenteiden resonanssitaajuudet voidaan ottaa huomioon lisäämällä vastaaviin terssikaistoihin 6 dB (yhteensä 12 dB). Itäisen metroradan tarkistusmittauksissa (Backholm 1999) on runkomelua arvioitaessa käytetty arvoa 15 dB kaavassa 26. Tikkurilan ydinkeskustan runkomeluselvityksessä Backholm (2006) on käyttänyt arvoa 10 dB kaavassa 26.

10.8 Yksiaksaalinen etenemismalli

Yksiaksaalisessa mallissa puristusaalto etenee säteen suunnassa suoraviivaisesti lähteestä havaitsijaan. Malli jaetaan riittävän moneen osaan riippuen aallon etenemisnopeudesta ja suurimmasta mallinnetusta taajuudesta. Tarkastelupisteen jälkeen mallia jatketaan riittävän kauas, että heijastukset eivät vaikuta tuloksiin. Geometrinen vaimennus otetaan huomioon kasvattamalla pinta-alaa ja massaa. Mallin voidaan otaksua toimivan hyvin, kun värinälähdettä voidaan pitää pistemäisenä ja etäisyys lähteen ja havaitsijan välillä on riittävän suuri. Havainnekuva yksiaksaalisen mallista ja sen rakennusosista (jousi, massa ja vaimennin) on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Yksiaksaalisen etenemismallin rakennusosat: jousi, massa ja vaimennin

Yksiaksaalinen malli perustuu Rayleighin-Ritzin¹⁷ periaatteeseen, jossa todellinen rakenne voidaan korvata sopivasti valitulla määrällä keskittyneitä massoja, efektiivisiä jousia ja vaimentimia. Jos keskittyneiden massojen määrä lähestyy ääretöntä, lähestyy ratkaisu tarkkaa analyttistä vastausta. Approksimaatio saadaan, kun massakeskittymien määrä rajataan äärelliseksi.

¹⁷ John W. Strutt, Lordi Rayleigh (1842-1919) ja Walther Ritz (1878 – 1909)

Aaltojen mallintamisessa pidetään riittävän mallinnustarkkuuden rajana yhdeksää solmua lyhintä aallonpituutta kohden, jolloin saavutetaan vähintään 90 % tarkkuus (Hall 2000 viitaten Lysmer 1978). Elementin koko (Δx) voidaan johtaa, kun tunnetaan leikkausaallon etenemisnopeus ja suurin aallonpituus. Leikkausaallon etenemisnopeus kalliossa (hyvälaatuisen graniitti tai gneissi) on noin 2000 m/s ... 2500 m/s ja puristusaallon etenemisnopeus on 4000 m/s ... 4700 m/s (Vuolio 1985). Aallonpituus saadaan, kun etenemisnopeus jaetaan tarkasteltavalla taajuudella.

$$\lambda = \frac{v}{f}. \quad (27)$$

Näin ollen pienin aallonpituus taajuudella 250 Hz on puristusaalloille

$$\lambda_p = \frac{4000 \frac{m}{s}}{250 \frac{1}{s}} = 16m$$

ja leikkausaalloille

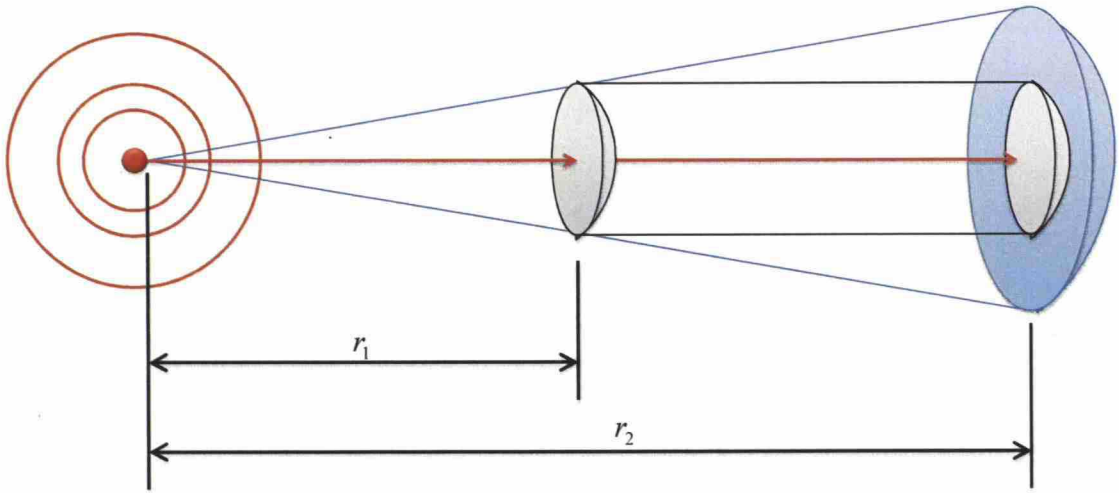
$$\lambda_s = \frac{2000 \frac{m}{s}}{250 \frac{1}{s}} = 8m.$$

Tästä voidaan johtaa riittävä elementin koko (9 solmua eli 8 elementtiä aallonpituutta kohti)

$$\Delta x_p = \frac{\lambda_p}{8} = 2m,$$

$$\Delta x_s = \frac{\lambda_s}{8} = 1m.$$

Kallion jousivakio riippuu paikallisista olosuhteista. Jos oletetaan kallion olevan hyvälaatuisia gneissia, saadaan (in situ) kimmomoduulin arvioksi $E_{app} = 31,6 \text{ GPa}$ (RockLab 1.0 2002). Kuten kalliomekaniikassa yleensä, on tähän arvoon sisällytetty kalliomassan virheiden elastisuutta heikentävä vaikutus. Vaimennus koostuu kahdesta komponentista: geometrisesta vaimennuksesta ja sisäisestä vaimennuksesta. Geometrinen vaimennus muodostuu kuvan 12 mukaisesti, kun sama energiamäärä levittäytyy yhä suuremmalle pinta-alalle.



Kuva 12. Geometrisen vaimennuksen muodostuminen

Koska pistemäisen lähteen tuottama energia on käänteisesti verrannollinen pinta-alaan, jolle se on levittäytynyt, saadaan kahden pinnan energiaintensiteettien suhteeksi

$$\frac{I_{E2}}{I_{E1}} = \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2.$$

Energiasuureiden suhde kinemaattisiin suureisiin (u , v ja a) on neliöllinen, joten pistemäisen lähteen vaimennussuhteeksi saadaan

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{a_2}{a_1} = \frac{r_1}{r_2}.$$

Referenssietäisyydeksi r_1 voidaan ottaa ensimmäisen solmun sijainti ja tarkasteluetaisyydeksi r_2 viimeisen solmun etäisyys tärinälähteestä. Näin meneteltäessä mallinnusvirhe muodostuu mahdollisimman pieneksi. Geometrisen vaimennuksen formulointi sauvamallin matriiseihin esitetään liitteessä G.

Koska kallion sisäinen vaimennus on pieni ja alhaisten taajuuksien aallonpituudet ovat suuria, voidaan materiaalivaimennuksen sekä rakojen ja ruhjeiden vaikutus jättää huomioimatta arvioitaessa hyvälaatuisen kiven vaimennusta. Jos materiaalivaimennusta (esim. Rayleighin vaimennus tai muu soveltuva vaimennusmalli) halutaan käyttää, tulee sen pe-

rustua paikalta mitattuun vaimentumaan tai muuhun kokeelliseen menetelmään. Referenssiaineistoon perustuva laskennallinen materiaalivaimennus sisältää liikaa epävarmuustekijöitä, jotta sen huomioiminen parantaisi laskennan tarkkuutta.

Työn tulosten laskennan vertailuun käytetty yksiulotteinen malli rakennettiin käyttämällä normaaleja diskretoidun sauvan värähtelyn matriisikaavoja sekä yllä esitettyjä periaatteita vaimennukselle, elementtien määrällä sekä aika-askeleelle. Yksiulotteisen mallin yhtälöiden johto sekä menetelmän perusteet on esitetty työn liitteessä G. Herätteenä mallille annettiin mittapisteen MP4B takaisinlaskettu heilahdusnopeuden huippuarvo. Tässä laskennassa käytetyt yksiaksiaalisen mallin parametrit olivat:

$$\rho = 2645 \text{ kg} / \text{m}^3$$

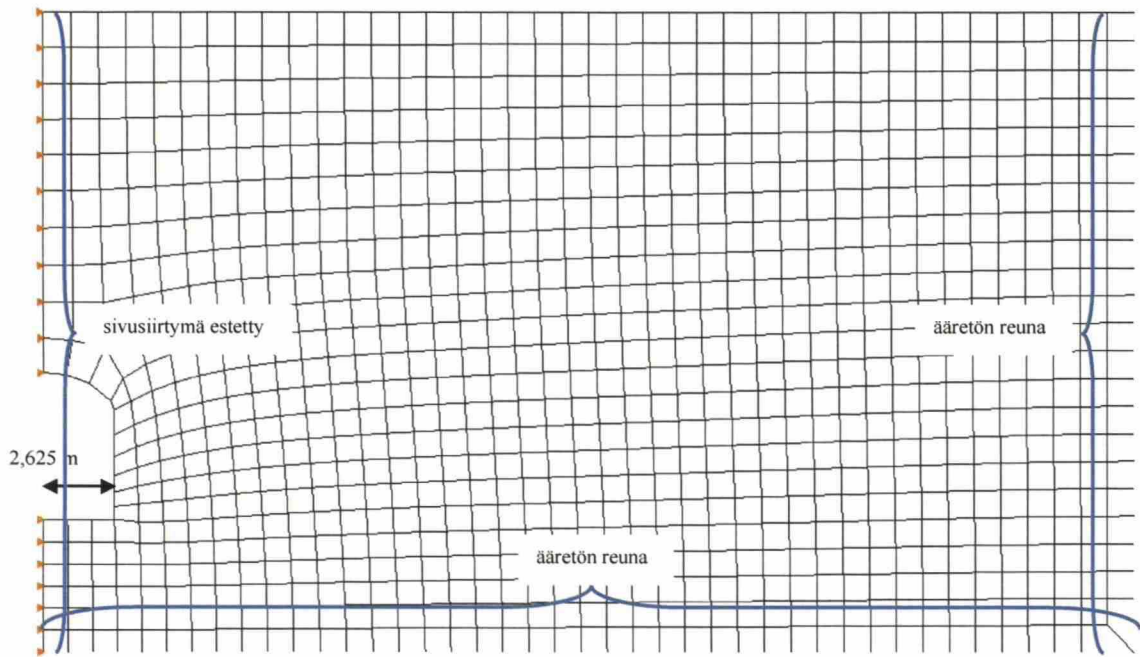
$$E = 73500 \text{ MN} / \text{m}^2$$

$$\nu = 0,25$$

$$f_{\max} = 200 \text{ Hz} .$$

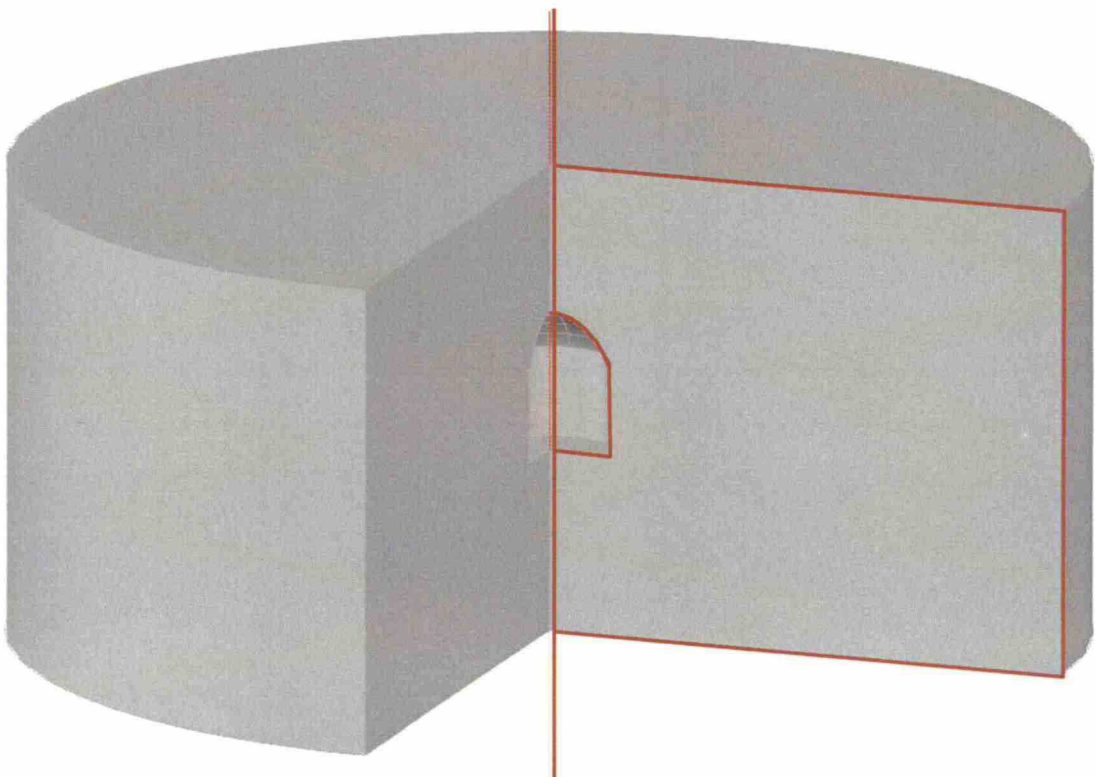
10.9 Mallintaminen elementtimenetelmällä

Tärinän etenemistä mallinnettiin myös FEM-ohjelmalla Abaqus 6.6-2. Laskennassa käytetty solmunumerointi on esitetty työn liitteenä D. Ongelma mallinnettiin 24 metriä (23 elementtiä) korkeana ja 41 metriä (40 elementtiä) leveänä pyörähdysymmetrisenä mallina. Alareuna ja ulkoreuna mallinnettiin äärettömillä elementeillä (CINAX4) puoliavaruuden kuvaamiseksi. Äärettömien elementtien käyttö on suositeltavaa, koska muuten aallot heijastuvat ja taittuvat rajapinnassa. Aksisymmetriselle akselille (kuvassa 13 vasemmalla) asetettiin vaakasiirtymä estetyksi. Yläreunalle ei määritetty reunaehtoja, koska ei olla kiinnostuneita aallon etenemisestä fluidiin ja aallonnopeuksien ero on niin suuri (1/13), että käytännössä melkein kaikki energia heijastuu. Ongelman kuvauksessa käytetty nelisolmuisista aksisymmetrisistä elementeistä (CAX4 ja CINAX4) koostuva verkko on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Mallinnuksessa käytetty verkko (994 solmua, 883 CAX4-elementtiä ja 63 CINAX4-elementtiä)

Mallinnettua puoliavaruutta on havainnollistettu kuvassa 14. Sylinterin vaippa ja pohja ovat kuvasta poiketen äärettömiä, koska ne on mallinnettu äärettömillä elementeillä.



Kuva 14. Aksisymmetrisen mallin mallintama avaruus

Aksisymmetrinen malli valittiin sen geometrisen vaimennuksen vuoksi. Aksisymmetrinen malli voidaan muodostaa pienemmällä määrällä vapausasteita kuin kolmiulotteinen malli. Kun tärinälähde on pistemäinen, ei aksisymmetrisyysoletus tee suurta virhettä. Virhelähteiksi jäävät leikkausaaltojen tuottamat värähtelyt sekä usean lähteen värähtelyjen yhteisvaikutukset (interferenssi). Koska viivakuormat ovat suhteellisen lyhyitä suhteessa mallin kokoon ja koska aallon etenemisnopeus on suuri kalliossa, nämä virhelähteet oletetaan vähäisiksi.

ABAQUS/EXPLICIT käyttää keskeisdifferenssimenetelmää integroinnissa. Tämä tarkoittaa kahta asiaa. Ensiksi, aika-askelta koskeva laskentatuloksen stabiiliusehto saa muodon

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}} \left(\sqrt{1 + \xi^2} - \xi \right). \quad (28)$$

jossa ω_{\max} on mallin suurin ominaiskulmanopeus
 ξ on suurinta ominaiskulmanopeutta vastaava vaimennussuhde.
 (ABAQUS 2006a)

Elementin koon avulla ilmaistuna approksimaatio stabiiliusehdolle on

$$\Delta t_{\text{stable}} = \frac{L_e}{c_d}. \quad (29)$$

jossa L_e on mallin lyhin elementtiväli
 c_d on aallonnopeus materiaalissa.
 (ABAQUS 2006b)

Toisena huomionarvoisen seikkana ohjelman käyttöohjeessa varoitetaan, että estimaatti ei joissain tilanteissa ole konservatiivinen. Stabiiliuden voi tarvittaessa tarkistaa ajamalla sama malli läpi kahdella eri aika-askeleen arvolla ja vertailemalla saatuja tuloksia. On suositeltavaa siis approksimoida aika-askel ja tarkistaa stabiilius esimerkiksi puolittamalla aika-askel (mikä tuplaa laskenta-ajan).

Abaqus-laskennan lähtötietoina käytettiin seuraavia valintoja:

- nelisivuisen elementin sivun pituus oli hieman yli metri
- kallion tiheys 2645 kg/m³, kimmomoduuli 73,5 GPa ja Poissonin luku 0,25
- kuormitusfunktiona 40 km/h nopeutta vastaava amplitudin vaihtelu

- maksimikuormana 35,840 kN/m² (kuormituspinta-ala 21,648 m²)
- aika-askel 0,1 ms (0,0001 s)

10.10 Lattioiden ja seinien ominaistajuusanalyysi

Lattian (tai seinän) ominaistajuuksia tarvitaan, kun tutkitaan runkoäänen siirtymistä huoneeseen. Esitetyt arvot pätevät laatoille, joiden kuorma on jakautunut tasan. Epätasaisesti jakautunut kuorma lähellä reunoja (esim. kirjahylly) ei aiheuta suurta virhettä ratkaisuun, mutta painava esine laatan kentässä muuttaa yhtälöä oleellisesti. Karkea approksimaatio suorakulmaisen laatan alimmasta värähtelytaajuudesta saadaan Timoshenkon (1937) teoksessa esitetyllä kaavalla

$$f = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{D}{m} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)}, \quad (30)$$

jossa m on lattiarakenteen massa (lisättynä lattiakuormalla 30 kg/m²)
 a on laatan pituus suuntaan a
 b on laatan pituus suuntaan b
 D on laatan taivutusjäykkyys, ks. kaava 32.

Talja et al. (2002) ovat tutkineet lattioiden alinta ominaistajuutta ja esittävät jäykkyyskorjattuun vapaasti tuetun palkin värähtelyyn perustuvan kaavan

$$f = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \sqrt{1 + \left[2 \left(\frac{l}{b} \right)^2 + \left(\frac{l}{b} \right)^4 \right] \frac{(EI)_b}{(EI)_l}}, \quad (31)$$

jossa l on jäykemmän suunnan pituus
 $(EI)_l$ on jäykemmän suunnan taivutusjäykkyys
 b on heikomman suunnan pituus
 $(EI)_b$ on heikomman suunnan taivutusjäykkyys
 m on lattiarakenteen massa lisättynä lattiakuormalla 30 kg/m².

Käyttämällä sopivaa yritettä taipumalle, ominaistajuus ohuelle vapaasti tuetulle laatalle voidaan myös johtaa. Laatan taivutusjäykkyys on

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (32)$$

jossa E on kimmomoduuli [N/m²]

h on laatan korkeus
 ν on suppeumaluku (Poissonin luku).

Laatan taivutusvärähtelyn yhtälö on

$$D\nabla^4 w + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0, \quad (33)$$

jossa w on laatan taipuma
 ρ on laatan tiheys
 h on laatan korkeus.

Vapaasti tuetulle laatalle voidaan käyttää sinimuotoista yritettä

$$\hat{w}_{mn}(x, y) = \sin\left(\frac{m\pi x}{L_x} + \frac{m\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{L_y} + \frac{n\pi}{2}\right), \quad (34)$$

jossa m, n ovat ominaismuodon indeksejä (0, 1, 2, 3...)
 L_x on laatan pituus x-akselin suunnassa
 L_y on laatan pituus y-akselin suunnassa,

jolle tunnetaan ominaistajuuksien ratkaisu

$$f_{mn} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \left[\left(\frac{m\pi}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L_y} \right)^2 \right]. \quad (35)$$

Laajennetaan ratkaisu koskemaan myös laattoja, joiden taivutusjäykkyys ei ole sama molempiin suuntiin (ortotrooppinen ja/tai ortogeeninen). Kaava saa muodon

$$f_{mn} = \frac{1}{2\pi \sqrt{\rho h (1 - \nu^2)}} \left[\sqrt{(EI)_y} \left(\frac{m\pi}{L_x} \right)^2 + \sqrt{(EI)_x} \left(\frac{n\pi}{L_y} \right)^2 \right], \quad (36)$$

jossa $(EI)_x$ on laatan taivutusjäykkyys x-akselin ympäri [Nm^2/m]
 $(EI)_y$ on laatan taivutusjäykkyys y-akselin ympäri [Nm^2/m].

Kaavaa voi käyttää, kun laatta on ohut, iso- tai ortotrooppinen, homo- tai ortogeeninen ja vapaasti tuettu. Todellisten rakenteiden tuentatapa ei koskaan täysin vastaa ideaalista vapaata tuentaa, joten kaavalla saatava taajuus on hieman matalampi kuin rakenteen todelli-

nen taajuus. Kun laatta on jäykästi tuettu, on todellinen taajuus huomattavasti korkeampi kuin kaavan antama taajuus. Jäykästi tuetun laatan ominaistajuuksien ratkaisu voidaan hakea numeerisilla menetelmillä (esim. useimmat FEM-ohjelmat) tai monipuolisemmilla yriteillä (esim. Mathcad).

Mikäli laatan kentässä on enemmän pysyvää massaa, alenee rakenteen ominaistajuus. Tämä vaikutus on suurin kevytrakenteisilla laatoilla (esim. puurunkoinen lattia) joiden ominaistiheys ρ on suhteellisen pieni verrattuna kentässä esiintyvään massaan. Tällaisen lattian ominaistajuus voidaan arvioida otaksumalla laatta lyhyempään suuntaan kantavaksi palkiksi ja mallintamalla kentän massat pistekuormina. Tarkempi arvio taajuudesta saadaan mallintamalla laatta ja kuormat FEM-ohjelmalla. Kun rakenteelle asetetaan ylimääräisiä rajoitteita (esim. määräämällä värähtelyn muoto valitsemalla tiettyntyyppinen yrite), on tuloksena saatava ominaistajuus korkeampi kuin rakenteen todellinen ominaistajuus.

Puurakenteisten lattioiden mitoituskriteerit sekä mitoituskaavat on esitetty lähteessä Wood Focus (2004). Kirja sisältää myös puulattioiden kiihtyvyyttä ja taipumaa koskevaa ohjeistusta. Pehmeille maakerroksille voidaan käyttää Roëssetin (1977) määrittämää approksimaatiota leikkausaalloille:

$$f_n = \frac{(2n+1)c_s}{4H}, \quad (37)$$

jossa n on kokonaisluku 0, 1, 2 ...
 H on maakerroksen korkeus
 c_s on leikkausaallon nopeus.

(Hall 2000 viitaten Roësset 1977)

10.11 Koinsidenssianalyysi

Koinsidenssi-ilmiössä taivutusaalto etenee laattarakenteessa samalla nopeudella kuin ilma-ääni huoneilmassa (noin 344 m/s). Tästä seuraa värähtelyn voimakas vahvistuminen koinsidenssitaajuudella. Tyypillisesti koinsidenssitaajuudet ovat korkeita taajuuksia, eivätkä ne vaikuta runkomelua vahvistavasti. Levy- tai laattarakenteen koinsidenssitaajuus voidaan tarvittaessa laskea kaavasta

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi h} \sqrt{\frac{12\rho(1-\nu^2)}{E}}, \quad (38)$$

jossa c on äänen etenemisnopeus ilmassa, $T=20^\circ\text{C}$, $\text{RH}=50\%$ $\rightarrow 344,0$ [m/s]
 h on laatan paksuus [m]
 ρ on laatan tiheys [kg/m^3]
 ν on Poissonin luku
 E on rakenteen kimmomoduuli [N/m^2].

(Cremer & Heckl 1988 ja Gyproc 1992)

Oheisessa taulukossa 20 on laskettuna muutamien teräsbetonilattioiden koinssidenssitaajuksia, joista käy ilmi, että koinssidenssi-ilmiö ei tule kyseeseen teräsbetonilattioissa. Runkomeluun vaikuttavan koinssidenssi voi kuitenkin olla mahdollinen muilla materiaaleilla (esim. kipsi, puu ja metallit), kun $h < 20$ mm.

Taulukko 20. Teräsbetonilattioiden koinssidenssitaajuuksia (betoni C25/30)

Raja-arvo	120 mm	160 mm	200 mm	250 mm
f_c [Hz]	4746	3559	2847	2278

11 SUUNNITTELUN LÄHTÖTIEDOT

11.1 Olosuhteet

Tärinänvaimennuksen suunnittelutehtävässä on oleellista, että mittauspaikalla vallitsevat olosuhteet tunnetaan mahdollisimman hyvin. Maa- tai kallioperästä on tunnettava kerroksellisuus, maa- tai kivilajit sekä näiden ominaisuudet (joista tärkeimpänä in situ tiheys). On todennäköistä, että vaiheessa jossa tarkempia värähtelyanalyysyjä suoritetaan, on mittauspaikalla tai sen lähistössä suoritettu näytteenottoa ja/tai koemittauksia joiden perusteella vallitsevat arvot voidaan johtaa.

Mikäli olosuhdetietoja ei ole tai ne ovat huonot (liian kaukaa kohdealueesta tai liikaa epä-tarkkuustekijöitä) ei niitä pidä käyttää, vaan värähtelyanalyysia varten on suoritettava lisätutkimuksia riittävien olosuhdetietojen tuottamiseksi. Poissonin luku vaihtelee yleensä kivilajeilla hyvin tiukoissa rajoissa, joten sen puuttuminen ei ole este laskennalle, jos kivilaji ja tiheys kyetään määrittämään. Kivilajin kimmomoduuli voidaan määrittää esimerkiksi aaltojen saapumisajasta tai saapumisaikaerosta kun etäisyys tai näytteenottotaajuus on riittävän suuri.

Maaperässä on keskeistä tuntee hyvällä tarkkuudella maanäytteen in situ vesipitoisuus, sillä kyllästyneessä maaperässä veden aallonnopeus dominoi maan aallonnopeutta. Käytäntö on osoittanut, että tärinän voimakkuus jäätyneissä maaperissä on alhaisempi kuin sulassa maassa, joten routivassa maaperässä tulee varmistua siitä, että maa ei ole jäätnyt mittauksen aikana.

11.2 Ympäristötekijät

Värähtelyanalyysiin liittyvät mittaukset ovat herkkiä ympäristön aiheuttamille häiriöille. Jos ympäristössä on muita tärinälähteitä tai yleinen tärinätaso on muuten korkea, voi hyviä tuloksia olla vaikeata tai mahdotonta saada. Mikäli se on mahdollista, ympäristön häiriötekijöitä pitäisi minimoida päivinä, jolloin mittauksia suoritetaan. Jos minimointi ei ole mahdollista, on häiriöt todettava ja suljettava lopullisesta aineistosta ulos, etteivät ne vaikuta laskelmien tulosten luotettavuuteen. Johtuen käytettävästä tekniikasta, myös sähkölaitteet voivat häiritä mittauksia ja niiden aiheuttamat häiriöt tulee minimoida tai tunnistaa tulostuloukosta ja poistaa.

Ympäristön geometria on tunnettava, koska se vaikuttaa tärinän kulkuun oleellisesti. Jokainen häiriökohta jonka signaali kohtaa käyttäytyy kuin uusi lähde ja muuttaa geometrisen vaimentumisen yhtälöä. Näillä häiriöillä on erityisen suuri merkitys lähellä häiriölähdettä. Vapaat pinnat ja pinnat joissa aallon etenemisnopeuksien ero on suuri voivat aiheuttaa heijastuksia ja niiden sijainti on tunnettava, että heijastukset voidaan tarvittaessa tunnistaa ja poistaa (tai hyödyntää laskelmassa toisena mittaustuloksena). Kalliossa suurten rakojen ja heikkousvyöhykkeiden tunteminen on eduksi. Jos aalto kulkee heikkousvyöhykkeen läpi ja vaimenee sen vaikutuksena, siirtyy heikkousvyöhykkeen vaikutus esimerkiksi kimmomoduulin arvoon, ellei rakoa tunnisteta aineistosta. Rakoilun osalta tämä on toivottu vaikutus, koska kallion redusoitu kimmomoduuli on parempi mallinnuksen lähtöarvo kuin (ehjän) kiviäytteen kimmomoduuli. Käytettyjen anturien määrä rajoittaa tunnistettavien heikkousvyöhykkeiden määrää. Aallon pitää myös läpäistä heikkousvyöhyke, että sen vaikutus näkyisi tuloksissa.

Kun halutaan mallintaa tärinän siirtymistä runkoääneksi tai määrittää rakenteen ominaistuuksia on lisäksi tunnettava ympäröivien talojen perustamistapa, rakenteen geometria sekä ominaistuuuteen vaikuttavat materiaaliarvot (tiheys ja kimmomoduuli). Jos lisäksi tunne-

taan Poissonin luku, voidaan laskea etenemisnopeuksia rakenteessa. Jos huoneen vaimennus halutaan huomioida, tarvitaan tiedot myös huoneen absorptiopinta-alasta (huonekalujen pinta-alasta). Käytännössä rakenteita ei ole tarpeen laskea kovin tarkasti, sillä lattioiden ja seinien resonanssitaajuudet dominoivat syntyvää vastetta. Riittää tuntea lattian ja seinien rakenne ja materiaali kohtuullisella tarkkuudella.

11.3 Rajat ja raja

Käytännön värähtelytehtävät on aina rajattu geometrisesti tiettyyn kohteeseen (raja) sekä tavoitteeseen (rajaus). Geometriset lähtötiedot riippuvat siitä mihin tuloksia on tarkoitus käyttää ja kuinka ne on toimeksiannossa määritelty. Geometrinen alue voi kuvata esimerkiksi tutkittavan vaikutusalueen laajuutta, joka pitää tutkia joko systemaattisesti (tutkimuksia suoritetaan järjestelmällisesti esimerkiksi pisteruudukossa tai säteittäin lähteestä katsottuna) tai diskreetisti (tutkimuksia suoritetaan ennakkoselvitysten perusteella mitoittavimmissa kohdissa ja kohteissa joita ei voitu ennakkoselvitysten perusteella sulkea ulos tutkitavasta joukosta).

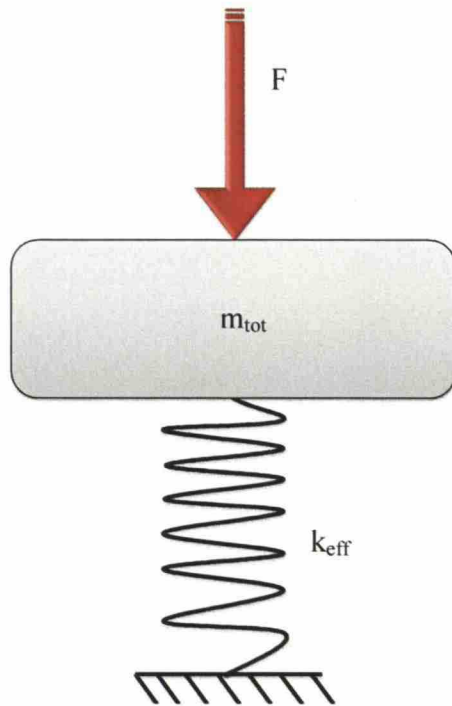
Värähtelytutkimuksilla on aina oltava tavoite. Jos tavoite on määrittää vaimennustarve rata-rakenteille, tarvitaan määrittää tärinän taso maanpinnalla tai rakennuksessa. Vaimennustarve on sallitun tärinätason ja määritetyn tärinätason erotus. Alustavassa suunnittelussa voidaan määrittää radan eri korkeusasemia ja linjauksia vastaavat ennustetut tärinävästeet maanpinnalla tai rakennuksessa. Jos odotettu ongelma on runkomelu, voidaan olemassa olevien rakenteiden ominaistajuudet laskea ja selvittää odotettavissa oleva tärinätaso (ja äänenpainetaso) rakennuksessa. Tulevan rakennuskannan runkomelu ja tärinähaitan estämiseksi voidaan laskea tärinätasot maan pinnassa ja määrittää ne taajuudet joita tulevien rakenteiden tulee välttää. Värähtelytutkimuksen suorittamistapa ja laajuus riippuvat suuresti tutkimuksen tavoitteesta. Käytettävän tarkkuuden tulisi olla sitä suurempi, mitä suuremmat ovat epäonnistumisen seuraukset.

12 TÄRINÄNVAIMENNUSRAKENTEEN SUUNNITTELU

12.1 Mallintaminen

Yksinkertaisin malli tärinävaimennusrakenteelle on harmoninen värähtelijä. Tätä mallia kutsutaan lineaariseksi elastiseksi malliksi. Mallissa on jousen varassa oleva massa, johon

tuodaan pakkovärähtely (heräte). Jousen vaste kuvaa systeemin läpäisevää värähtelyä (joka on tässä mallissa tasapainosta johtuen identtinen, mutta suunnaltaan vastakkainen herätteen kanssa). Tämä yksinkertainen malli on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Yksinkertaisin mahdollinen malli ratarakenteelle

Tällä mallilla voidaan tehdä karkea arvio ratarakenteen ominaistaajuudesta, kun otaksutaan että kaikki ratarakenteiden massa voidaan redusoida värähteleväksi massaksi ja ratarakenteen elastisuus voidaan laskea sarjaan kytketyistä komponenttien elastisuuksista kaavalla

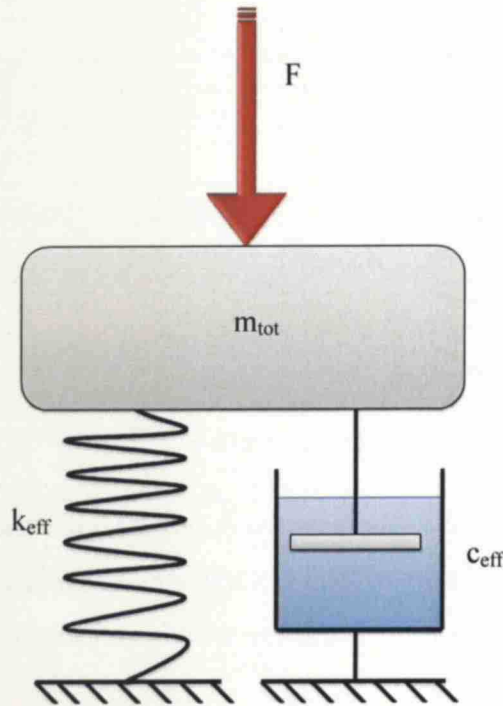
$$k_{eff} = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdots k_{n-1} \cdot k_n}{\sum_i k_i}, \quad (39)$$

jossa k on rakenneosan jousivakio
 n on rakenneosien lukumäärä
 i on juokseva indeksi 1, 2, 3 ... n-1, n.

Mallilla voidaan tutkia myös massan ja jousivakion vaikutusta amplitudiin, heilahdusnopeuteen ja kiihtyvyyteen. Herätettä vaihtelemalla voidaan tutkia akselipainon (herätteen amplitudin huippuarvo) sekä ajonopeuden (amplitudin vaihtelu ajan funktiona) vaikutusta

rakenteen värähtelyvasteeseen. Tässä mallissa ei ole vaimennusta lainkaan, joten rakenne jää värähtelemään alkutilanteen jälkeen vakioituvalla tavalla loputtomasti.

Mallia voidaan tarkentaa, kun siihen lisätään vaimennus. Helpoin tapa lisätä vaimennus on lisätä niin sanottu dashpot-vaimennin, kuten kuvassa 16 on tehty. Dashpot-vaimennin vaimentaa värähtelyä riippuen värähtelyn hetkellisestä heilahdusnopeudesta. Tämä on riittävän lähellä materiaalien todellista käyttäytymistä parantaakseen mallin tarkkuutta. Tätä mallia kutsutaan Kelvin¹⁸-Voigt¹⁹ malliksi ja se kykenee ottamaan huomioon viskoelastisuudesta seuraavan vaihe-eron.



Kuva 16. Ratarakenteen malli, kun malliin on lisätty vaimennin

Jos herätteenä (F) käytetään sinimuotoista aaltoa, voidaan alustaan kohdistuvan voiman amplitudia tutkia, ja huomata, että se riippuu vain herätteen ja rakenteen ominaiskulmanopeuden suhteesta

$$r = \frac{\omega}{\omega_n}, \quad (40)$$

¹⁸ Willian Thompsenin, Kelvinin ensimmäisen paronin, mukaan

¹⁹ Woldemar Voigtin mukaan

jossa ω on herätteen ominaiskulmanopeus
 ω_n on rakenteen ominaiskulmanopeus

ja vaimennussuhteesta

$$\zeta = \frac{c_{eff}}{2\sqrt{k_{eff} \cdot m_{tot}}}, \quad (41)$$

jossa c_{eff} on rakenteen vaimennusvakio
 k_{eff} on rakenteen jousivakio
 m_{tot} on rakenteen massa

jolloin vahvennuskertoimen yhtälöksi saadaan

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (42)$$

ja amplitudiksi

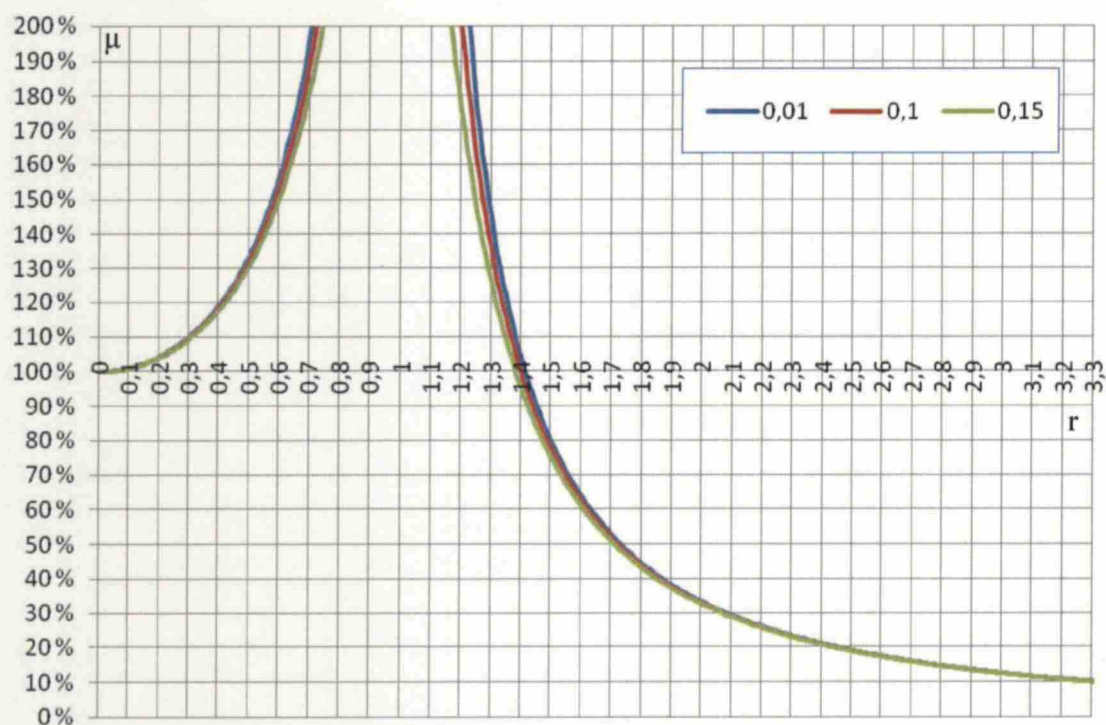
$$X = \frac{F}{k_{eff}} \mu, \quad (43)$$

jossa F on herätevoima
 k_{eff} on rakenteen jousivakio.

Vahvennuskertoimen yhtälöstä voidaan johtaa, että vaimennussuhteen ollessa pieni ($< 0,10$) voidaan vaimennussuhteeseen liittyvä termi pienenä unohtaa ja ominaiskulmanopeuksien suhteen oltava vähintään

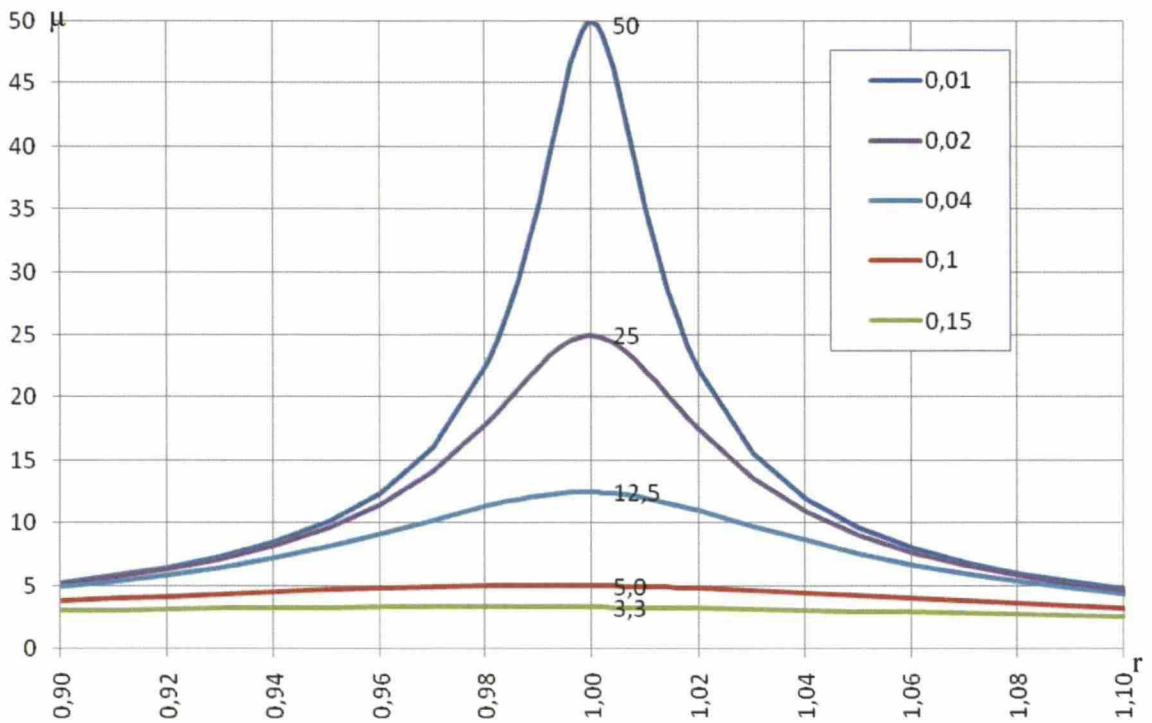
$$|1-r^2| > 1 \Rightarrow r > \sqrt{2}, \quad (44)$$

että vaimennusta ylipäättään tapahtuu. Tehokkaan vaimennuksen (vähennys 50 %) saavuttamiseksi ominaiskulmanopeuksien suhteen pitäisi olla 1,7-kertainen. Toisin sanoen, jos vaimennettavat taajuudet ovat alueella 50 Hz – 80 Hz tulee vaimennusrakenteen ominaistaajuuden olla 30 Hz – 47 Hz. Kannattaa huomata myös, että rakenteen ominaistaajuudella tapahtuva värähtely voimistuu huomattavasti ja ominaistaajuuden alapuolella jonkin verran.



Kuva 17. Vahvennuskerroin vaimennussuhteen ja kulmanopeuksien suhteen funktiona

Kuvassa 17 on havainnollistettu vahvennuskertoimen arvoja muutamilla eri vaimennussuhteen arvoilla. Kuvasta käy ilmi, että vaimennussuhteiden 0,00 – 0,15 erot jäävät vähäisiksi vaimennusalueella. Käytännön suunnittelutehtävissä voidaan tavanomaisia materiaaleja käytettäessä otaksua, että vaimennussuhteen vaikutus vaimennustehoon on nolla.



Kuva 18. Vahvennussuhteen arvoja resonanssissa ($r = 1$) eri vaimennussuhteen arvoilla

Kuvassa 18 on esitetty vahvennuskerroin kulmanopeuksien suhteen ollessa lähellä yhtä. Kuvasta nähdään, että vaimennussuhteella on suuri merkitys resonanssin voimakkuuteen. Rakenteen vaimennussuhde voidaan määrittää värähtelyn perättäisten huippujen suuruudesta. Vaimennussuhteen avulla voidaan puolestaan laskea suurin mahdollinen vahvennuskerroin resonanssissa. Vahvennuskerroin voidaan huomioida lisäämällä resonanssitaajuutta vastaavan terssikaistan arvoon vahvennuskertoimen verran. Näin voidaan huomioida rakenteen resonanssi, kun rakenne tunnetaan. Jos rakennetta ei tunneta, mutta sen vaimennussuhde voidaan arvioida etukäteen, voidaan koko taajuuskaistan yli käyttää resonanssin kerrointa. Tällöin saadaan konservatiivinen arvio odotettavissa olevasta tärinä- tai runkomelutasosta.

Kelvin-Voigt -mallin heikkous on sen kykenemättömyys mallintaa jännityshäviöitä. Jos mallia halutaan yhä tarkentaa, tulee siirtyä käyttämään vakiolineaarisolidimallia (engl. *Standard Linear Solid Model*, SLSM) tai vielä tarkempaa Maxwell-Weichert -mallia²⁰. Rakenteen liian tarkkaa mallintamista kannattaa välttää, ellei saada näyttöä siitä, että tulokset

²⁰ toiselta nimeltään yleistetty Maxwell-malli (engl. *Generalized Maxwell Model*)

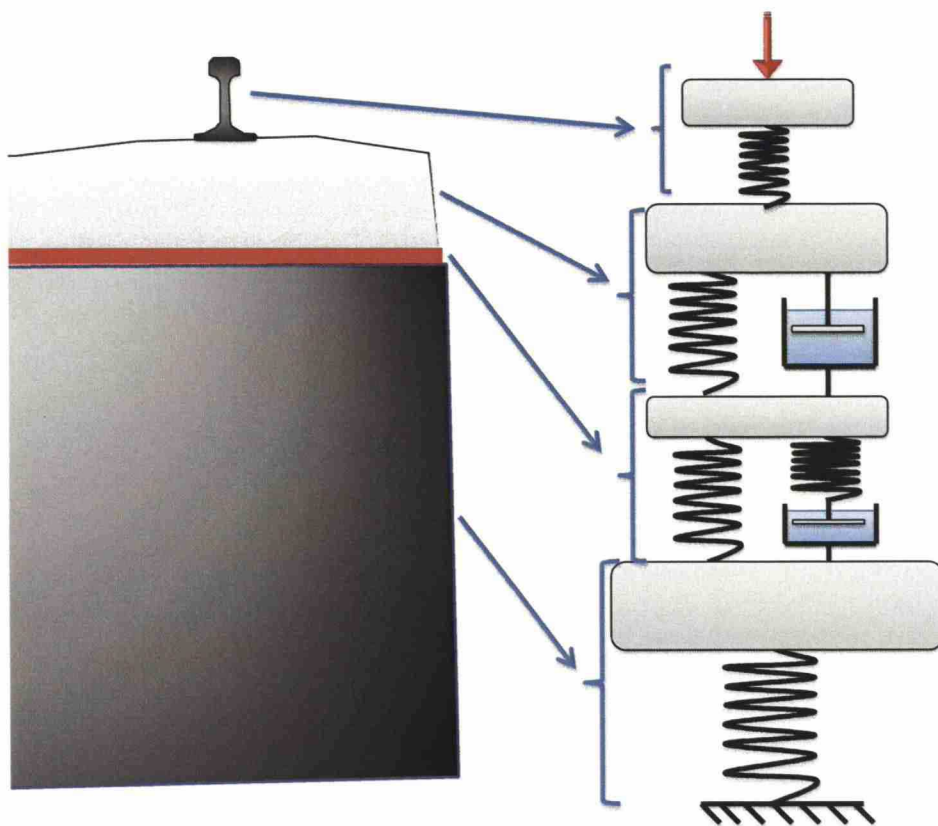
vastaavat mitattua todellisuutta ja tarkkuus paranee niin paljon, että sillä on merkitystä käytännön suunnitteluratkaisuiden kannalta.

Koska rakenne koostuu todellisuudesta useammasta rakenneosasta (joita voivat olla esim. metro, metron sekundaarijousi, metron primaarijousi, kisko, kiskon kiinnityslevy ja -jousi, kiskon aluslevy, ratapalkki, ratapalkin alusmatto (USP), kantava täyttö, tärinänvaimennusmatto jne.) tulee kukin osa mallintaa ominaisuuksineen erikseen, jos mallin tarkkuutta halutaan kasvattaa. Tietyille systeemin osille voi olla riittävää käyttää yksinkertaisempaa mallia. Alla on taulukoitu (taulukko 21) mitä malleja voidaan ajatella käytettävän millekin rakenteen osalle.

Taulukko 21. Ratarakennetta kuvaavan systeemin rakennusosat

Rakennemalli	Mallin ominaisuudet	Soveltuvat rakenneosat
Lineaarinen elastinen malli	yksinkertaisin mahdollinen malli	koko rakenteen karkea approksimaatio, ratakisko, esijännitetty betoninen ratapalkki
Maxwell-malli	huomioi jännityshäviöt	vähän viruvat vaimennusrakenteet, puinen ratapalkki
Kelvin-Voigt -malli	huomioi viruman	vaimennusrakenteet, esijännitetty betoninen ratapalkki
Vakiolineaari-solidimalli (SLSM)	huomioi viruman ja jännityshäviöt	kaikki
Maxwell-Weichert -malli	huomioi ajasta, lämpötilasta ja muista parametreista riippuvan virumat sekä jännityshäviöt	kaikki

Kuvassa 19 on esitetty esimerkki miten ratarakennetta voidaan mallintaa. Ratarakenteesta muodostetaan osarakenteiden avulla malli, joka kuvaa koko rakenteen värähtelyvastetta. Esimerkissä on rakennettu ratarakenteen malli ratapalkin alusmatolla varustetulle ratarakenteelle käyttämällä kolmea eri osamallityyppiä. Jos täytön kerrosten ominaisuudet eroavat toisistaan merkittävästi, tulisi nekin mallintaa omina osamalleinaan.



Kuva 19. Ratarakenne on mallinnettu yhdistämällä neljä osamallia kokonaisuudeksi.

12.2 Mitoittaminen

Tärinänvaimennusrakenne mitoitetaan vaimentamaan värähtelyä siten, että kohteessa annettu raja-arvo ei ylitä. Tärinänvaimennusrakenteen kannalta tarvittavat tiedot ovat heräte ja sallittu vaste. Tärinänvaimennusrakenteen oman ominaistajuuden pitää olla riittävän alhainen, että vaimennusalue saadaan riittävän kattavaksi. Yleensä (kun ζ on pieni) vaimennuksen alkamiskohta on $\sqrt{2} \approx 1,414$ kertaa tärinänvaimennusrakenteen ominaistajuus.

Yleensä raja-arvo tunnetaan havaitsijan luona (ihminen, laite tai rakenne). Sieltä se voidaan laskea taaksepäin aina värähtelylähteen luokse käyttämällä joko värähtelyn etenemisen kaavaa, numeerista laskentaa tai analyyttistä mallia. Matkalla tapahtuvat häviöt (värähtelyn siirtyminen materiaalista toiseen, materiaalin virheet ja lähikentän geometriset vaikutukset) voidaan tarvittaessa huomioida, jolloin laskennan tarkkuus paranee. Näin saadaan suurin sallittu vaste värähtelyrakenteen toisella puolella. Muuntamalla heräte ja sallittu vaste värähtelytasoiksi, voidaan niiden erotuksesta määrittää vaadittu syöttöhäviö desibeleissä.

Syöttöhäviö voidaan määrittää esimerkiksi oktaavikaistoittain, jolloin värähtelyn taajuussäältä tulee huomioiduksi.

12.3 Optimointi

Ratarakenteen värähtelävyyden optimointi on vaativa tehtävä. Optimointia voidaan suorittaa usean eri (osittain toisistaan riippuvan) tekijän suhteen. Jos värähtelävyyden voimavaroja voidaan analyttisesti johtaa yhtälöksi (esim. rakennemalleista koostuva yhtälö, kuten yllä), voidaan muuttujan paikalliset minimi löytää derivoimalla yhtälöä tutkittavan muuttujan suhteen ja asettamalla derivaatta nolaksi. Käytännössä tämä ei yleensä onnistu, vaan on luotettava esimerkiksi Monte Carlo –optimointiin.

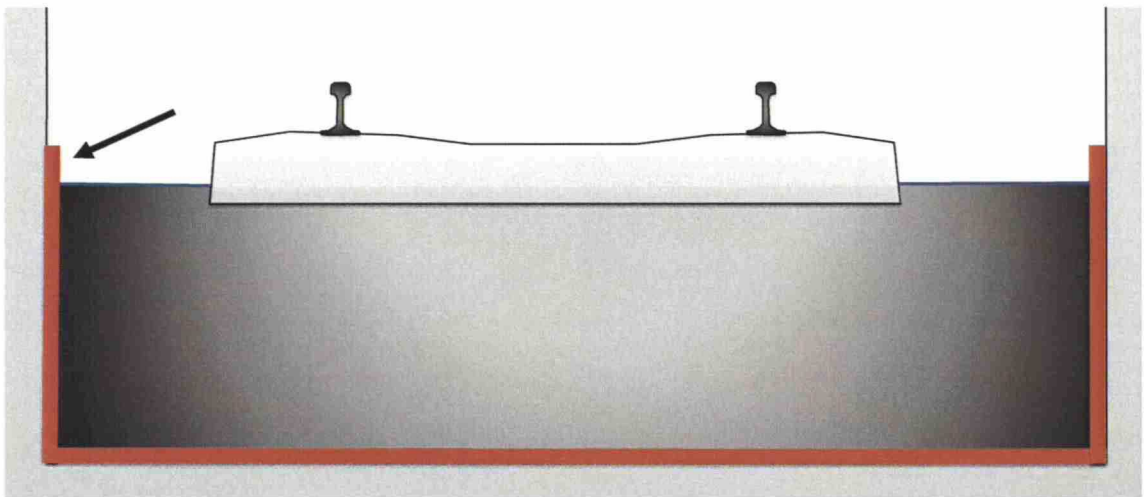
Monte Carlo –menetelmässä arvotaan yksittäisellä laskentakerralla käytettävät parametrit (esim. valittu materiaali, materiaalipaksuus, radan tyyppi, heräte, sallittu vaste jne.) käyttäen realistisia jakaumia tutkittaville suureille. Jokaisella laskentakerralla parametrit arvotaan uudelleen. Toistamalla laskentaa riittävän paljon (esim. 100 000 kertaa tai 1 000 000 kertaa) saadaan esille optimaaliset suunnitteluratkaisut. Tämä menetelmä on helppo ohjelmoida ja laskenta on nopea suorittaa. Lisää tarkkuutta saadaan valitsemalla testattavat suureet edustavasti (esim. Latin Hypercube Sampling –menetelmällä), jolloin voidaan käyttää myös huomattavasti pienempää toistojen määrää (esim. 1 000 tai 10 000 toistoa).

Aikaan sidoksissa olevien kustannusten osalta voidaan käyttää samantapaisia oletuksia kuin rakennusalan Monte Carlo –simulaatioissa yleensä (esim. Graphisoft Control). Jakaumien osalta voidaan kuormitukselle käyttää log-normaalijakaumaa tai normaalijakaumaa, materiaaliominaisuuksille normaalijakaumaa sekä luonnonkuormille tarvittaessa Gumbel-jakaumaa. Jos todellisia jakaumia, joissa tapahtumien lukumäärä on riittävän suuri, on saatavilla joko kohteesta tai referenssikohteesta, myös niitä voidaan käyttää. On tärkeää huomata, että kokonaisvarmuuskertoimella ei ole merkitystä optimoinnissa, mutta osavarmuuskertoimet vaikuttavat tulokseen. Näin ollen osavarmuuskertoimet on syytä valita tarkoituksenmukaisesti tai joidenkin parametrien vaikutus voi muodostua dominoiviksi ja johtaa Monte Carlo –optimointia harhaan.

12.4 Rakenneratkaisut

Tässä kappaleessa esitetään muutamia rakenneratkaisuja, joiden on havaittu tehokkaasti vaimentavan värähtelyä. Kaikkia värähtelyn vaimennusrakenteita ei ole esitetty ja on suositeltavaa tarkastella kaikki suunnitteluhetkellä käytössä olevat vaihtoehdot. Tavoitteena on esitellä rakenneratkaisujen toimintaperiaate sekä mahdolliset erot suunnitteluratkaisujen välillä.

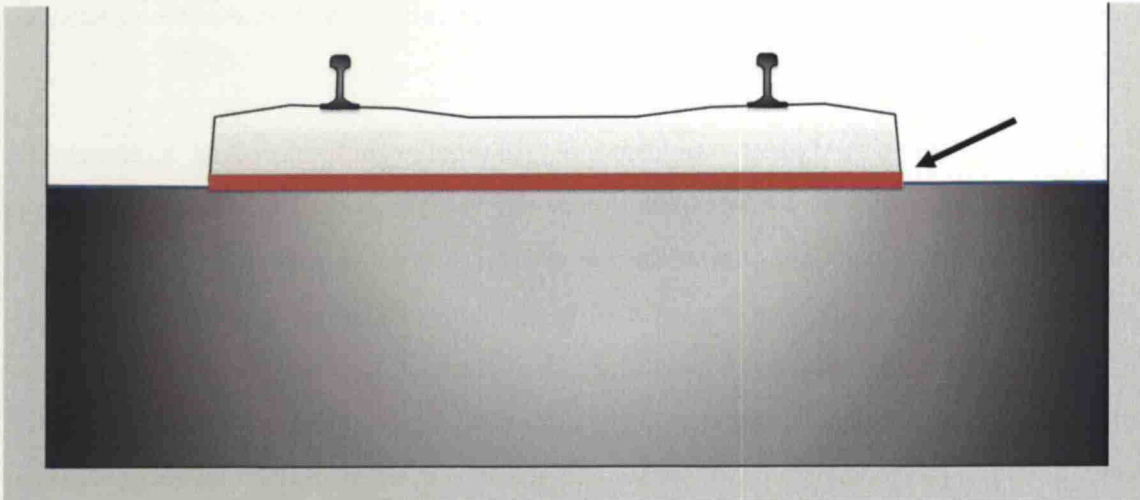
Kun vaimennussuhde on pieni, saadaan ominaiskulmanopeutta laskettua kasvattamalla massaa (huomattavasti) tai vähentämällä ratarakenteen jäykkyyttä. Yksi ratkaisu on eristää koko ratarakenne täytön ja kalliomassan välisellä elastisella kerroksella. Eri materiaalin-toimittajien tarjoamat ratkaisut eroavat toisistaan, mutta dynaamisesti niiden vaikutus perustuu suureen massaan (koko ratarakenteen paino) elastisen jousen (tärinänvaimennusmatto) päällä, joten rakenteen toiminnan analysointi on helppoa, mikä parantaa suunnittelun luotettavuutta. Tällä rakenteella on yksi ilmeinen heikkous: se tuo radan rakentamiseen ylimääräisen työvaiheen. Rakenteen vahvuutena on alhainen ominaistaajuus, jolloin vaimennuksen teho paranee. Värähtely ominaistaajuudella ja sen alapuolella vahvistuu, mutta tämä ei yleensä aiheuta ongelmia. Tärinänvaimennusmatto on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Tärinänvaimennusmatto on esitetty punaisella.

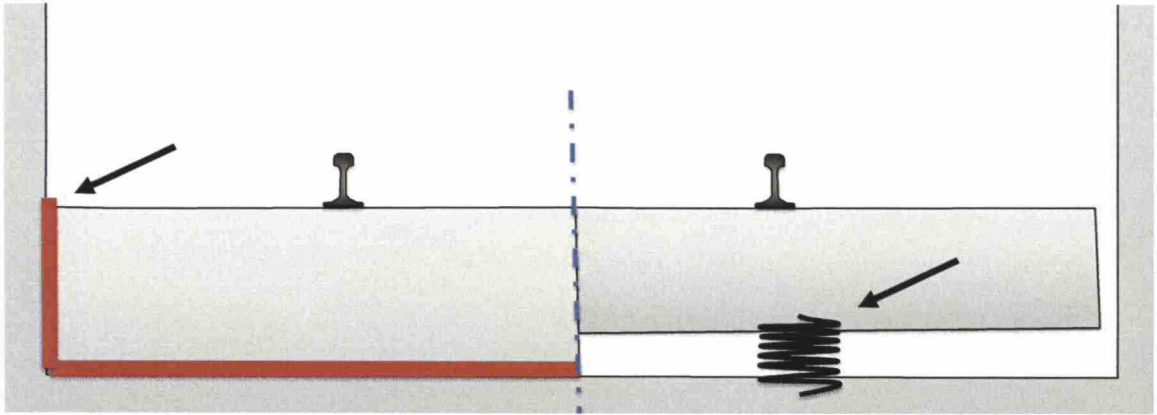
Eräs toinen vaihtoehto on asentaa vaimennus suoraan (betoniseen) ratapölkkyyn elementti-tehtaalla. Tällöin ylimääräinen työvaihe jää pois, mutta samalla jousen (tärinänvaimennusmaton) päällä oleva massa putoaa murto-osaan. Menetelmän etuna on ratarakenteen huol-

toivälin pidentyminen sekä asennusnopeus ja haittana heikompi vaimennusteho. Lisäksi ratapalkin ja kiskojen liikkeen amplitudi kasvaa. Tämä vaihtoehto on esitetty kuvassa 21. Vaihtoehdon englanninkielinen nimi on *Under Sleeper Pad*, USP, ja sen vapaa suomennos on ratapalkin alusmatto.



Kuva 21. Ratapalkin alusmatto on esitetty punaisella.

Kolmas, harvinaisempi vaihtoehto, on rakentaa rata massiivisen betonilaatan varaan. Tällöin ratarakenteen massa nousee hyvin painavaksi. Ratarakenteen jousena voidaan käyttää jatkuvaa tärinänvaimennusmattoa, nauhamaisia tärinänvaimennuskaistoja, diskreettejä tärinänvaimennuslevyjä tai teräsjousia. Mitä pienempi tukipinta-ala, sitä pienempään ominaistajuuteen voidaan päästä. Viimeiseksi mainitulla vaihtoehdolla päästään erityisen alhaisiin ominaistajuuksiin (alle 10 Hz), jolloin käytännössä kaikki värähtely tulee poistetuksi. Tämä menetelmä on kallis ja työteknisesti hidas, mutta se on vaimennusteholtaan erittäin tehokas ja voi mahdollistaa ratalinjaukset hyvin läheltä häiriökohteita. Teräsbetoninen ratarakenne on myös hyvin pitkäikäinen. Kelluva betonilaatta on esitetty kuvassa 22 kahdella eri jousivaihtoehdolla (vasemmalla jatkuva tärinänvaimennusmatto ja oikealla diskreetti jousituenta).



Kuva 22. Kaksi betonilaatan jousivaihtoehtoa esitettynä

13 KENTTÄMITTAUKSET

13.1 Tutkimusoletukset

Metroliikenne on hyvin erilaista kuin esimerkiksi junaliikenne. Metrolle on ominaista hitsatut kiskot, lähes vakiona pysyvä akselipaino sekä paikan suhteen vakiona pysyttelevä ajonopeus. Junaliikenteen kiskot, akselipainot ja ajonopeudet sekä näiden vaihtelu eroavat merkittävästi metroliikenteestä. Tämä aiheuttaa merkittävän eron myös herätteeseen. Metroliikenteen pienempi akselipaino on huomattavasti tavarajunan painoa pienempi, mikä pienentää amplitudia voimakkaasti. Metro ei liikennöi öisin, minkä voi ajatella sallivan suuremmat raja-arvot metroliikenteelle. Toisaalta metrojunat kulkevat lähtökohtaisesti asutuskeduksissa tai niiden välittömässä läheisyydessä, joten metron mahdollisesti aiheuttama haitta koskettaa suurempaa joukkoa ihmisiä. Aiempiin mittauksiin perustuen, ennakoitiin, että koska mitattavat värinät ovat pieniä, voi häiriöttömän mittauspaikan löytäminen osoittautua vaikeaksi tai mahdottomaksi.

Tärinää päätettiin mitata noin 15 – 30 metrin päästä radasta, jolloin värinän pitäisi olla riittävän suurta erottuakseen taustatasosta ja ulkoisten häiriöiden ei pitäisi pystyä sotkemaan mittauksia. Etäisyys vastaa myös kohtalaisella tarkkuudella suunnitellun uuden metrotunnelin syvyyttä. Kenttämittaukset kohdennettiin niihin osa-alueisiin, joita koski suurin epätie-toisuus ja epävarmuus. Yksi merkittävä epävarmuus liittyi sopivan mittauspaikan löytymiseen, joten mittauspaikan löytämiseksi vaiheittain tarkentuvalle rajausmenetelmällä tehtiin suunnitelma. Toinen epävarmuus liittyi mitattavan värinän luonteeseen ja voimakkuuteen,

mitä yritettiin ennustaa esimitauksilla. Ennen varsinaisia mittauksia, katsottiin järkevaksi suorittaa soveltuvuustutkimus muutamalla tärinäanturilla ja melumittarilla.

Edellä esitettyjen perustelujen nojalla tehtiin seuraavat hypoteesit:

- Jokin tekijöistä vaihteet, haaraumakohdat, kiihdytykset, jarrutukset tai kaarekirs-kunta aiheuttaa suurimmat häiriöt
- Sopiva mittauskohde sijaitsee noin 15 m – 30 m etäisyydellä radasta kalliossa

Edellä esitettyjen hypoteesien perusteella päätettiin tutkia seuraavia seikkoja:

- Missä syntyvät metron aiheuttamat suurimmat ilmaäänepaineet?
- Mikä on merkittävin metron aiheuttama häiriö?
- Voidaanko käytössä olevalla laitteistolla mitata tärinää 15 m – 30 m etäisyydellä?

13.2 Mittauslaitteisto

Mittalaitteina käytössä oli yksi kappale äänenpainemittareita Brüel & Kjær Type 2250 (kuva 25) sekä viisi tärinämittaria (Instantel Minimate Plus, kuva 24). Tärinämittarien kanssa käytettiin yhtä Instantelin normaaligeofonia (Instantel Standard Triaxial Geophone) sekä kolmea tarkkuusgeofonia (Instantel X10 Low Level Triaxial Geophone, kuva 23) sekä yhtä erityisherkkää geofonia (Instantel X100 Low Level Triaxial Geophone). Kampin mittapis-teiden keskinäisten etäisyyksien mittauksen suoritus teetettiin mittausalan ammattilaisella. Mittauksiin käytetty laite oli Takymetri TRIMBLE S6 5” DR 300+ (kuva 26). Laitteiston työn kannalta oleelliset tarkkuudet on esitetty taulukoissa 22a, 22b sekä 22c.

Taulukko 22a. Käytetyn mittalaitteiston tarkkuus

Laite	Omamelutaso [dBZ]	Laatustandardi
Brüel & Kjær Type 2250	25,9	IEC 61672-1 luokka 1

Taulukko 22b. Käytetyn mittalaitteiston tarkkuus

Laite	Erottelutarkkuus [mm/s]	Laatustandardi
Standard Triaxial Geophone	0,0159	DIN 45669-1
X10 Low Level Triaxial Geophone	0,00159	DIN 45669-1
X100 Low Level Triaxial Geophone	0,000159	DIN 45669-1

Taulukko 22c. Käytetyn mittalaitteiston tarkkuus

Laite	Erottelutarkkuus [mm]	Laatustandardi
Trimble S6	$\pm 1,00$	DIN 18723



Kuva 23. Instantel X10 Low Level –geofoni asennettuna alumiinijalustalle (taustalla GSM-antenni)



Kuva 24. Instantel Minimate Plus värinämittari ja geofoni



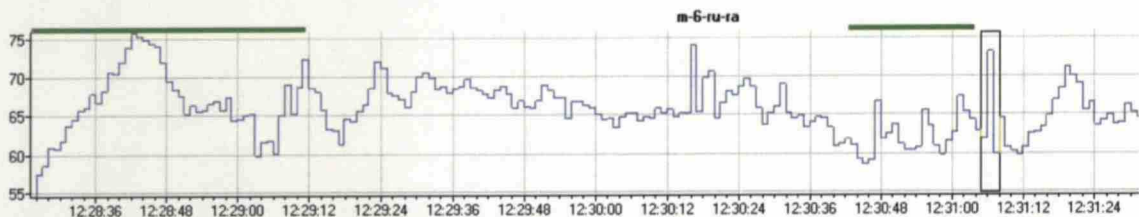
Kuva 25. Melumittari Brüel & Kjær Type 2250



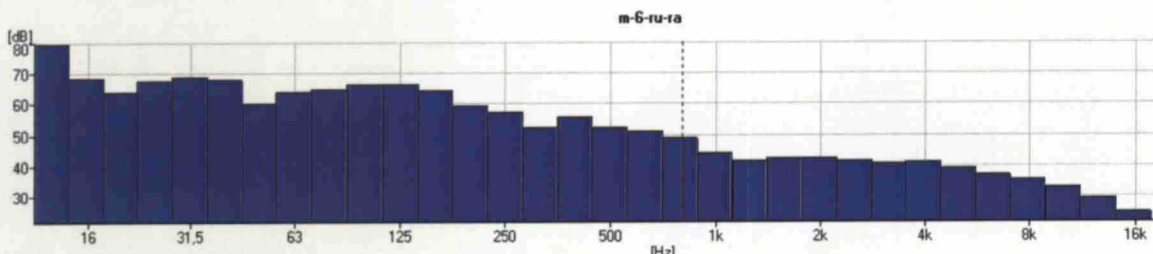
Kuva 26. Trimble S6 5'' DR 300+

13.3 Esiselvitykset

Torstaina 24.7.2008, koko itäinen metrolinjasto ajettiin molempiin suuntiin läpi opaskartan (Karttakeskus – Helsinki opaskartta & hakemisto 1:15 000), GPS-vastaanottimen (Magellan SporTrak Map) ja äänenpainemittarin (Brüel & Kjær Type 2250) kanssa. GPS-dataa saatiin liian vähän, että sitä olisi voitu hyödyntää. Mittaukset suoritettiin metrojunan ajosuuntaan ensimmäisen junavaunun sisältä 50 cm korkeudelta lattiasta. Äänenpainetason aikahistoria tallennettiin lokiin, josta yhdessä karttamerkintöjen kanssa voitiin määrittää häiriölähteiden sijainnit. Kuvissa 27 ja 28 on esitetty kuudennen ajon (Ruoholahti – Rautatieasema) tuloksia. Mitattujen äänenpainetasojen perusteella määritettiin otolliset kohteet Kamppi, Puotila sekä Kalasatama. Samalla selvisi, että kiihdytys ja jarrutusvaihe eivät tuota suurimpia äänenpainetasoja. Kaarrekirkkunta (Puotila) kuulostaa erittäin ärsyttävältä, mutta on äänenpainetasoltaan taustatasoa vastaavaa. Vaihteiden ja hitsattujen kiskojohtokosten yllitystä ei voi erottaa signaalista luotettavasti lainkaan. Kiskon haarautumiskohdat erottuivat äänenpainetasoissa 10 dB ... 15 dB:n nousuna. (Uotinen 2008)



Kuva 27. A-ekvivalentti äänenpainetaso välillä Ruoholahti – Rautatieasema (vihreät merkit kuvaavat asemia)



Kuva 28. Äänen painottomaton taajuussisältö terssikaistoittain edellisessä kuvassa korostetussa häiriökohdassa

Mittaustulokset on esitetty kappaleessa 14.2 alkaen sivulta 92.

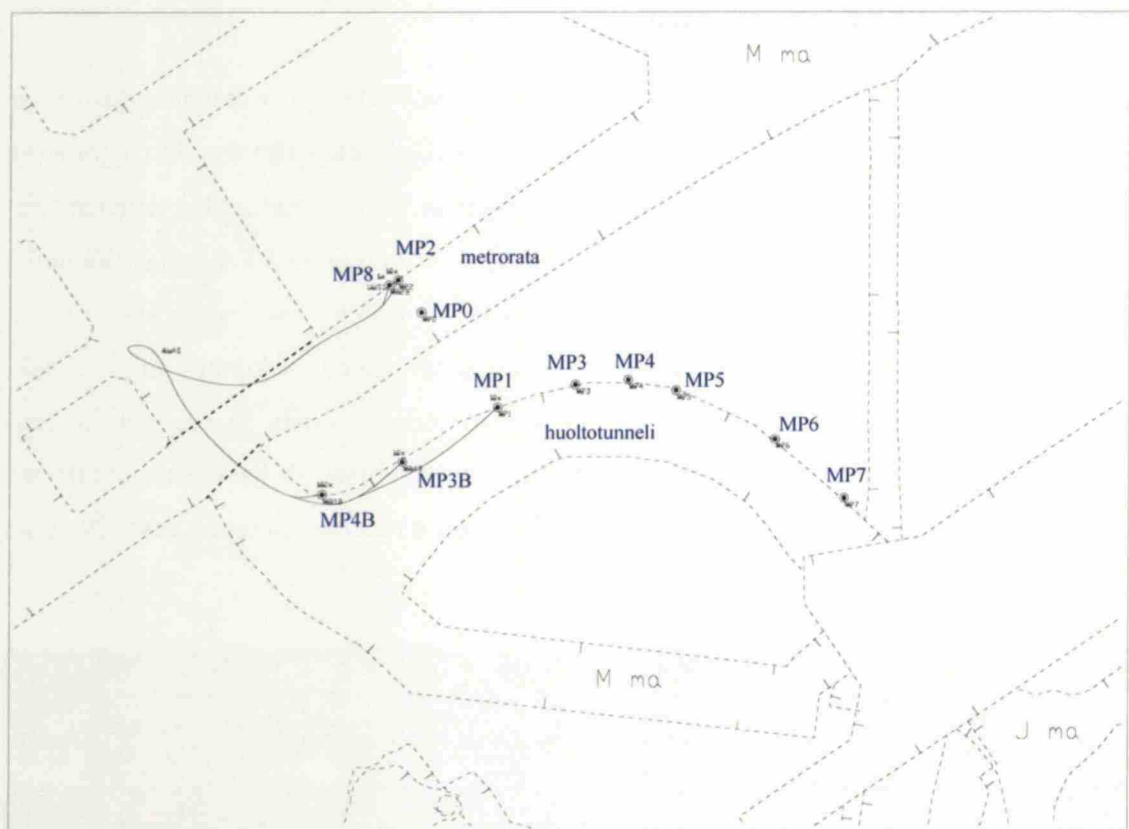
13.4 Mittausjärjestely Kampissa

Kampin mittauspaikkaa käytiin katsomassa torstaina 14.8.2008 ja mittalaitteet alustavia tutkimuksia varten vietiin paikalleen perjantaina 15.8.2008. Yksi tärinämittari sijoitettiin tärinälähteen viereen metrotunnelin seinään ja toinen mitattavan kalliotilan seinään. Tärinämittareilla mitattiin heilahdusnopeutta, v [mm/s], ajan funktiona 1024 kertaa sekunnissa. Kalliotilaan sijoitettiin myös äänenpainemittari ilmaäänen arvioimiseksi. Äänenpainemittari mittasi lineaarista (eli painottomatonta) äänenpainetta sekunnin tarkastelujaksoissa. Äänenpainemittari asennettiin 1,5 m päähän tärinäanturista ja suunnattiin koh-tisuoraan seinää vastaan. Kolmijalan ansiosta äänenpainemittari oli kaikissa mittauksissa 1,2 metrin korkeudella. Häiriölähteeksi oletettiin radan haarautumiskohta (kuva 29) pian Kampin metroaseman itäpuolella.



Kuva 29. Oletettu häiriölähde (kiskon haarautumiskohta)

Kampissa suoritettavien mittauksen tehtävänä oli selvittää tyypillinen metron aiheuttama tärinäspektri (taajuustasossa) ja määrittää tärinän vaimentuminen kalliossa, jonka mekaaniset ominaisuudet tunnetaan. Tärinä- ja äänenpainemittaukset suoritettiin Kampin metroaseman itäpuolella, eteläisellä linjalla sekä linjan ali ja vieressä kaartavasta huoltotunnelista. Kuvassa 30 on esitettynä mittauspaikka ja anturien sijainti tunneleissa ja taulukossa 23 anturien etäisyydet origosta (oletettu häiriölähde) sekä kulmaero. Pisteiden välisen geometrian mitanneen ammattilaisen mukaan tarkkuus kahden eri tunneleissa sijaitsevan tarkepisteen välillä ± 10 mm (samassa tunnelissa sijaitsevien pisteiden keskinäinen virhe on ± 1 mm).



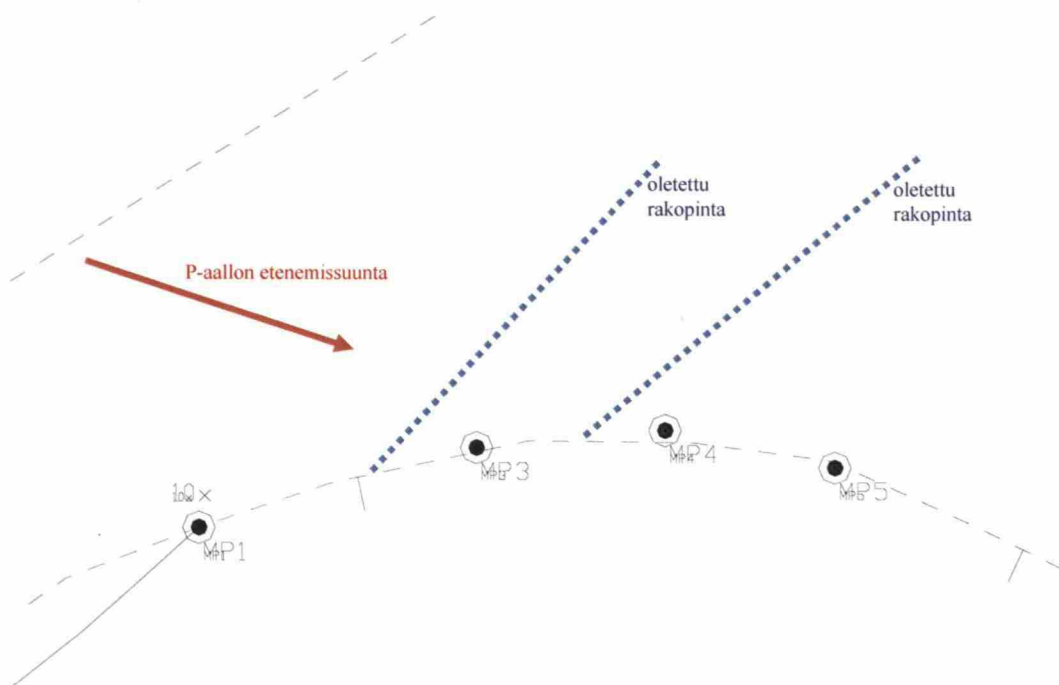
Kuva 30. Mittausjärjestelyt Kampin metroaseman itäpuolella (kuva ei ole mittakaavassa)

Taulukko 23. Mittauspisteiden lyhin etäisyys (r), syvyysero (r_{vert}) sekä kulmaero (α)

Koodi	Kuvaus	r [m]	r_{vert} [m]	α [°]
MP0	Radan haarautumispiste, origo	0,000	0,000	0,000
MP1	Etäisyyden tarkkailupiste 1 (+0 m)	12,631	-1,689	-7,680
MP2	Kohtisuora piste metrotunnelissa	5,491	0,283	90,0 ²¹
MP3	Etäisyyden tarkkailupiste 2 (+5 m)	17,600	-0,852	-2,775
MP4	Etäisyyden tarkkailupiste 3 (+10 m)	22,482	-0,289	-0,737
MP5	Etäisyyden tarkkailupiste 4 (+15 m)	27,505	0,403	0,840
MP6	Etäpiste 1 (35 m)	38,808	1,716	2,534
MP7	Etäpiste 2 (50 m)	47,814	3,345	4,012
MP3B	Etäisyyden varapiste 2B (+5 m)	15,789	-2,878	-10,503
MP4B	Etäisyyden varapiste 3B (+10 m)	21,747	-4,437	-11,773
MP8	Kohtisuora varapiste metrotunnelissa	5,491	0,283	90,000

²¹Erikoistapaus, koska mittapiste sijaitsee eri tasolla tärinän etenemiseen nähden. Tämän mittapisteen tulos muunnettiin erikseen määritetyllä geometrisen vaimentumisen kertoimella muita pisteitä vastaavaksi.

Ensimmäisissä mittauksissa mittareita oli sijoitettu mittapisteisiin MP1, MP2, MP3, MP4 ja MP5. Mittausten tuloksista kävi nopeasti ilmi, että anturien MP3, MP4 sekä MP5 tulokset olivat huomattavan paljon liian pieniä ehjälle kalliolle. Tarkasteltaessa huoltotunnelin ruis-kubetonin vaalentumia (merkki vedenjohtavuudesta) ja halkeamia (merkki vaakaliikkeestä) kävi ilmi, että anturien MP1 ja MP3 välissä sekä anturien MP3 ja MP4 välissä on todennäköiset rakopinnat (kuva 31). Näiden johtopäätösten seurauksena päätettiin siirtää kaksi anturia (MP4 ja MP5) vara-asemiin MP3B ja MP4B. Siirretyistä antureista saatua dataa voidaan käyttää suuruusluokka-arviona arvioitaessa rakojen aiheuttamaa vaimennusta (raon vaimennus on suuruusluokkaa 50 % ... 75 % amplitudista).



Kuva 31. Oletetut rakopinnat mittapisteiden MP1-MP3 ja MP3-MP4 välillä

Mittaustulokset on esitetty kappaleessa 14.3 alkaen sivulta 92.

13.5 Esiselvitys Puotilantie 8:ssa

Kampissa suoritettavien mittausten tehtävänä oli selvittää tyypillinen metron aiheuttama värinäspektri ja värinän eteneminen kalliossa etäisyyden funktiona. Mittausten toissijainen tavoite oli määrittää rakenteesta mitatun värinän siirtyminen ilmaääneksi ja tertiaarinen tavoite oli määrittää maaperästä tai kallioperästä mitatun värinän siirtyminen rakenteeseen.

Osoitteessa Puotilantie 8 (talot A, C sekä D) suoritettiin alustavat äänenpainemittaukset kuvassa 32 nuolilla merkityissä rakennuksissa. Mitattavalla alueella on metrotunneliin asennettu kaksinkertainen kerros tärinänvaimennusmattoa.



Kuva 32. Mittauskohde Puotilantie 8 (metrolinjan projektio hahmoteltu kuvaan oranssilla)

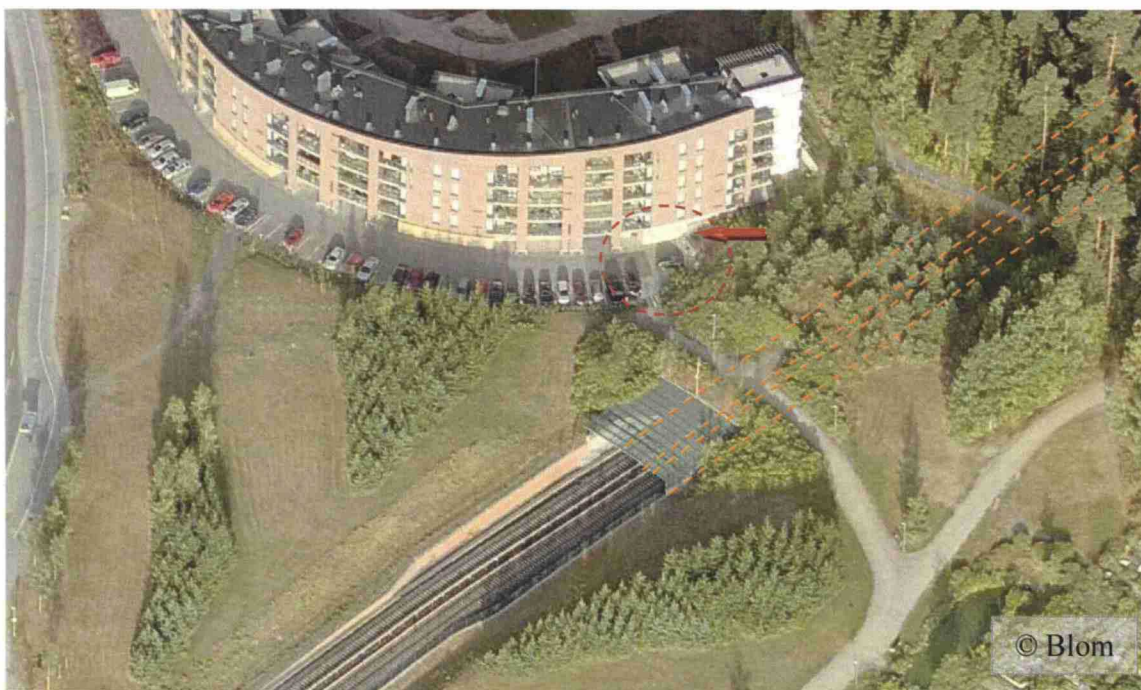
Alustavien mittausten perusteella Puotilantie 8:n kiinteistöt eivät sovellu värähtely- ja äänenpainemittauksiin, koska signaali hukkuu kokonaan taustakohinan sekaan (tarkempi kuvaus kappaleessa 14), joten vastaava kohde päätettiin etsiä lähistöltä. Tärinänhaitan oletettiin kasvavan, kun kalliokatto jää pienemmäksi, etäisyys ratatunneliin lyhyemmäksi ja alueelle ei ole asennettu tärinänvaimennusmattoa. Tällainen paikka löytyi 300 metriä kaakkoon, osoitteesta Juorumäenkuja 1, aivan metron suuaukon vierestä.

Mittautulokset on esitetty kappaleessa 14.4 alkaen sivulta 100.

13.6 Mittaukset Juorumäenkuja 1:ssä

Juorumäenkuja 1:ssä suoritetuilla mittauksilla oli sama tavoite kuin Puotilantie 8:n suunnitelluilla mittauksilla. Valittu paikka oli ihanteellinen. Etäisyys mittaustaipaikkaan (kuva 33) ja metrotunnelin välillä oli vain 20...30 metriä eikä tälle rataosalle ole asennettu vaimennusta

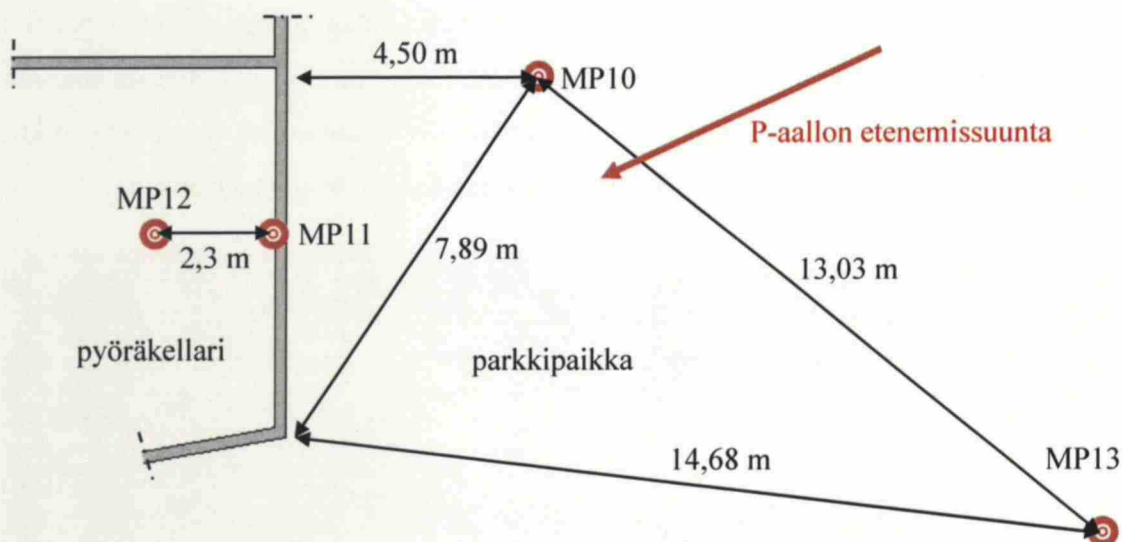
(Backholm 1999). Junan ajonopeus on suuri sen syöksyessä sillan jälkeen tunneliin. Näiden tekijöiden yhteisvaikutuksesta alueella mitattavien värinöiden pitäisi hyvin kuvata suurinta mahdollista haittaa mitä metro voi tuottaa. Juorumäenkuja 1 mittaukset antavat hyvän kuvan metron aiheuttaman haitan enimmäistasosta rakennettaessa lähelle metrorataa.



Kuva 33. Mittausten suorituspaikka Juorumäenkuja 1:ssä (punainen nuoli osoittaa pyöräkellarin sijainnin ja kuva on otettu idästä päin)

Mittauksissa käytettiin äänenpainemittaria sekä neljää värinämittaria. Äänenpainemittari suunnattiin kohti mittauspistettä MP12 mitattaessa runkoääntä lattiasta ja kohti mittapistettä MP11 (1,5 m etäisyydellä) mitattaessa runkoääntä seinästä. Mittapiste MP12 sijaitsi mahdollisimman keskellä huoneen lattiaa ja mittapiste MP11 mahdollisimman keskellä seinää (korkeudella 1,65 m). Mittapiste MP10 sijoitettiin kiinni kallionpaljastumaan ja mittapiste MP13 noin 40 cm paksuun tiiviiseen maakerrokseen. Mittauspaikan järjestelyt on osoitettu kuvassa 34. Koska välimatkoilla ei ollut merkitystä, on mittaukset suoritettu mittakelalla (arvioitu mittausvirhe ± 50 mm).

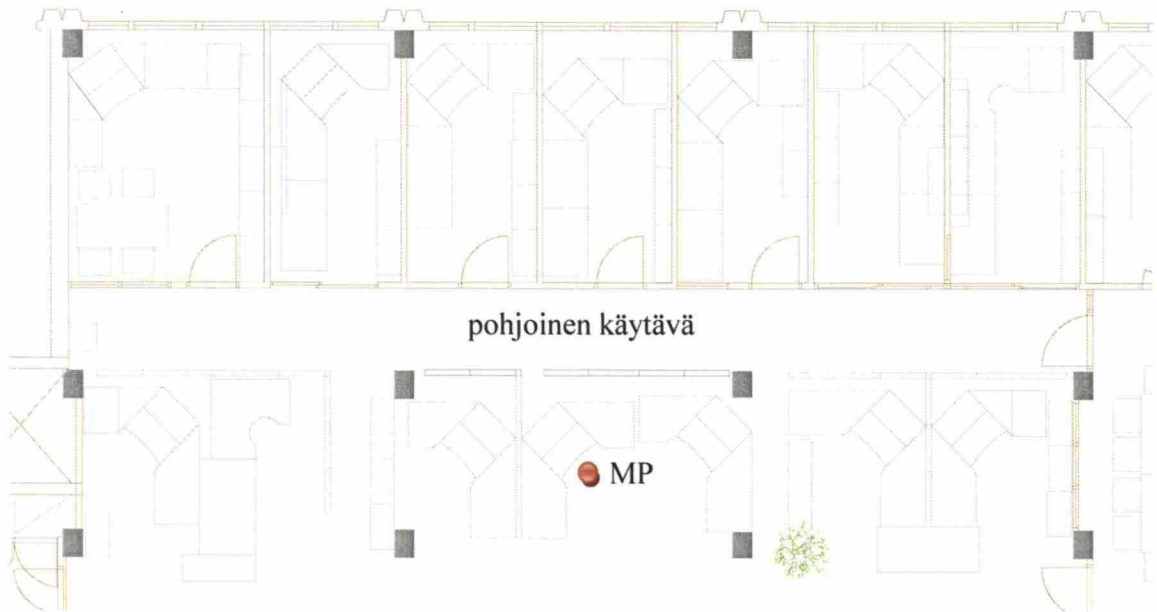
Mittaustulokset on esitetty kappaleessa 14.5 alkaen sivulta 101.



Kuva 34. Mittausjärjestelyt Juorumäenkuja 1:ssä

13.7 Esiselvitys Asemamiehenkuja 2:ssa

Koska Juorumäenkuja 1:ssä ei pystytty mittaamaan runkoääntä (värähtelyn siirtyminen rakenteesta kuultavaksi ilmaääneksi) yritettiin mittauksia suorittaa kohteessa, jossa korvin kuultavaa ukkosenomaista jyllinää tiedettiin varmasti olevan. Tavoitteena oli mitata tärinä tarkalla kiihtyvyysanturilla ja selvittää sitä vastaava äänenpainejakauma terssikaistoittain. Herätteenä toimivat rakennuksen vierestä ajavat raitiovaunut. Mittaukset suoritettiin aamulla (kello 07:00 – 07:30), kun muita työntekijöitä ei ollut paikalla ja ohi ajavan raitiovaunun heräte on suurimmillaan. Ilmastointi pidettiin päällä, jotta tilanne vastaisi paremmin käyttötilannetta. Kolmannessa kerroksessa sijainnut avokonttori, jossa mittauksia suoritettiin, on esitettynä kuvassa 35.



Kuva 35. Mittausjärjestelyt kohteessa Asemamiehenkuja 2 (punainen pallo on mittauspiste)

Mittaustulokset on esitetty kappaleessa 14.6 alkaen sivulta 103.

14 TUTKIMUSTULOKSET

14.1 Yleistä

Mittausten ja mallintamisen avulla pyrittiin tunnistamaan värähtelyn etenemiseen liittyviä trendejä, testaamaan tutkimushypoteesien paikkansapitävyyttä sekä arvioimaan eri menetelmien käytettävyyttä. Myös alustavien mittausten tulokset on esitetty, mikäli mittausten tuloksista (tai niiden puuttumisesta) oli pääteltävissä jotain. Mittauksissa ja mallintamisessa on tutkittu P-aallon etenemistä, ellei toisin mainita. P-aaltoa tutkittiin, koska sen otaksutaan läpäisevän kallion häiriöitä paremmin. Kappaleissa 14.2 – 14.6 on esitetty mittaustulokset ja kappaleissa 14.7 sekä 14.8 mallinnustulokset. Työn tärkeimmät tulokset ja johtopäätökset pohjautuvat Kampin mittaussarjaan, joten sitä koskeva kuvaus kappaleessa 14.3 on laajin. Viimeisessä kappaleessa on pohdittu tutkimuksiin liittyviä haasteita ja keinoja niihin vastaamiseksi.

Tärinäanturit mittasivat heilahdusnopeutta [mm/s] ja niiden nollaviiva tasattiin ohjelmallisesti ennen tuloksen huomioimista. Nollaviivan tasauksessa analysointiohjelma otaksuu, että mitatun nopeuden tulisi olla keskimäärin 0 mm/s (koska anturi ei ole oikeasti liikkunut

mihinkään) ja laskee tätä korjausta vastaavan lineaarisen siirtymän. Ohjelma laskee myös RMS-painotetun tehollisarvon (ks. kaava 10), jonka integrointiajaksi valittiin 1 sekunti.

14.2 Alustavat runkomelumittaukset

Kampissa suoritettujen alustavien runkomelumittausten perusteella FTA:n kaava (26) antaa johdonmukaisia tuloksia. Vertailuun otettiin 4,5 tunnin mittausjakson kaksi suurinta äänenpainemittarin mittaustulosta ja syötteenä käytettiin suurinta tärinäanturin mittaustulosta. Valitut tulokset eivät ole samalta ajanjaksolta, mutta ne edustavat mittaustulosten huippuarvoja. Mittaustulokset ja ennusteen tekemä virhe on esitetty taulukossa 24.

Taulukko 24. Tärinän siirtyminen runkoääneksi (ilman A-painotusta)

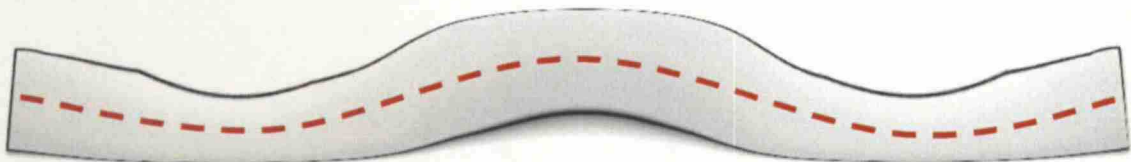
Taajuus	31,5 Hz	40 Hz	50 Hz	63 Hz	80 Hz
Tärinä (re 50 nm/s) [dB]	49,5	54,3	58,1	56,1	54,3
Runkomeluennuste (+6 dB) [dB]	55,5	60,3	64,1	62,1	60,3
Mittaustulos 1 [dB]	60	65	73	71	66
Mittaustulos 2 [dB]	56	63	66	68	64
Virhe tulokseen 1 Δ_1 [%]	4,5	4,7	8,9	8,9	5,7
Virhe tulokseen 2 Δ_2 [%]	0,5	2,7	1,9	5,9	3,7

Runkomelun ennustettu taso on odotetusti jonkun verran alhaisempi kuin mittaustulokset. Tämä voi johtua siitä, että runkomelun ennustaminen on kalibroitu vastaamaan noin 20 neliömetrin niukasti kalustettua huonetta (esim. tyypillinen makuuhuone). Lisäksi, koska tunnelit ovat yhteydessä toisiinsa, on mahdollista, että osa mitatusta äänestä on suoraa tai uudelleensäteilyttä ilmaa.

14.3 Mittaukset Kampissa

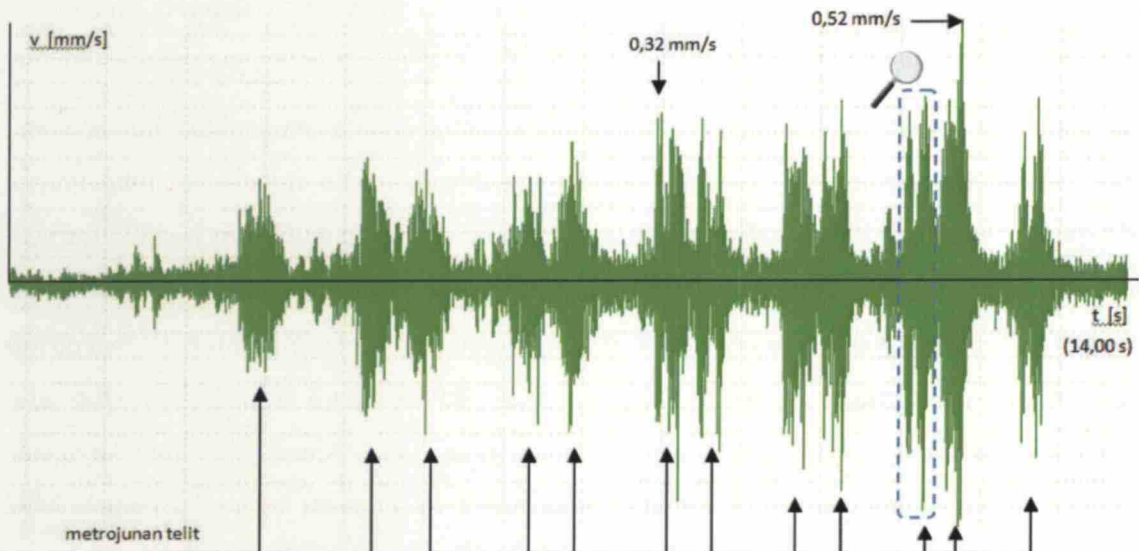
Tuloksia analysoitaessa lähikentässä (engl. *Near Field*) aaltorintama kohtaa kulmia, joiden vaikutus huomioitiin geometrinen suhteiden avulla oletetun aaltogeometrian mukaisesti. Kulmat toimivat uusina lähteinä ja muuttavat siten aaltorintaman geometriaa kuvassa esitetyllä tavalla. Geometrian muutosten yhteydessä aaltorintaman energiaintensiteetti muuttuu.

juudet. Ilman tarkempia selvityksiä ei voida sanoa mikä aiheuttaa terävän piikin. Alustavat ominaistajuuksilaskelmat osoittavat kuitenkin, että taajuus on liian korkea ollakseen esimerkiksi kiskon ominaistajuus. Reicke & Poppin (2005) tutkimusten perusteella kyseessä voisi olla betonisen ratapalkin toinen symmetrinen taivutusmuoto (havainnollistettu kuvassa 37). Myös toiseen suuntaan kulkeneen metron spektrissä piikki on 154 Hz kohdalla, mikä vahvistaa käsitystä, jonka mukaan kyseessä on ratarakenteen tai metron ominaistajuus.



Kuva 37. Ratapalkin toinen symmetrinen taivutusmuoto (muodonmuutoksia on liioiteltu)

Oheisessa kuvassa 38 on esitetty tyypillinen metrojunan aiheuttama pystysuuntainen heräte mitattuna metrotunnelin seinästä mittauspisteestä MP2 (katso kuvat 30 ja 36).



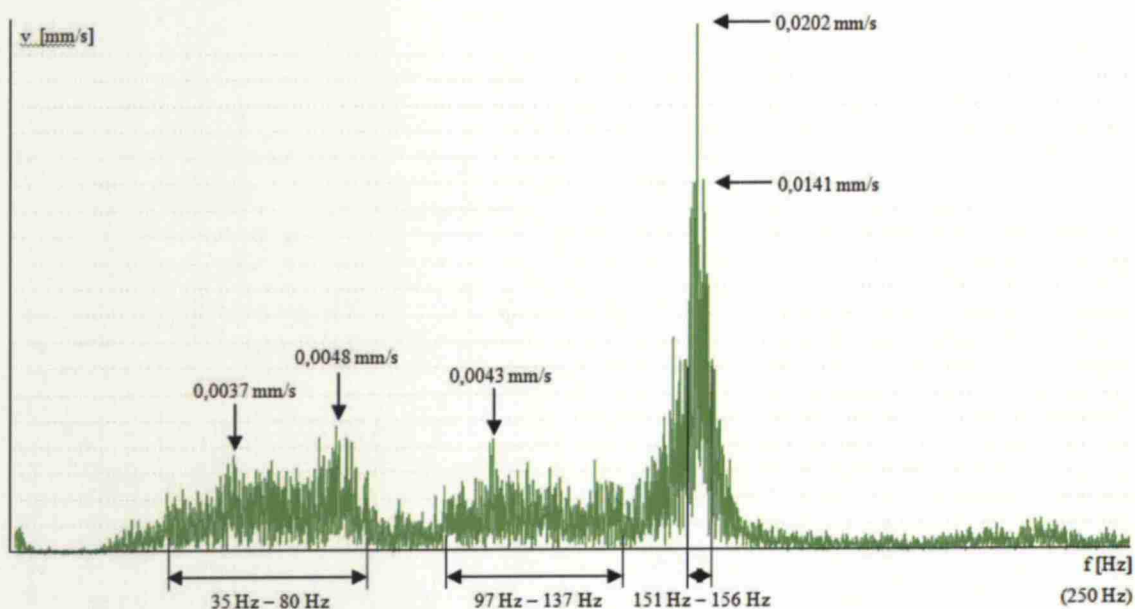
Kuva 38. Tyypillinen metrojunan aiheuttama pystysuuntainen värähtelynopeus (mitattu kello 09:57 torstaina 18.9.2008, mittaustiedosto M189CDJN.N50)

Tarkasteltaessa lähikuvaa kuvassa 38 katkoviivalla korostetusta telin ylitystä nähdään, että tärinä koostuu harmonisista värähtelyistä. Lähikuva telin ylityksestä on esitetty kuvassa 39. Huiput ovat 6,5 millisekunnin päässä toisistaan, eli lähes kaikki värähtely tapahtuu 154 Hz taajuudella.



Kuva 39. Telin kahden pyörän ylitykset ja värähtelyn muoto tarkemmalla resoluutiolla

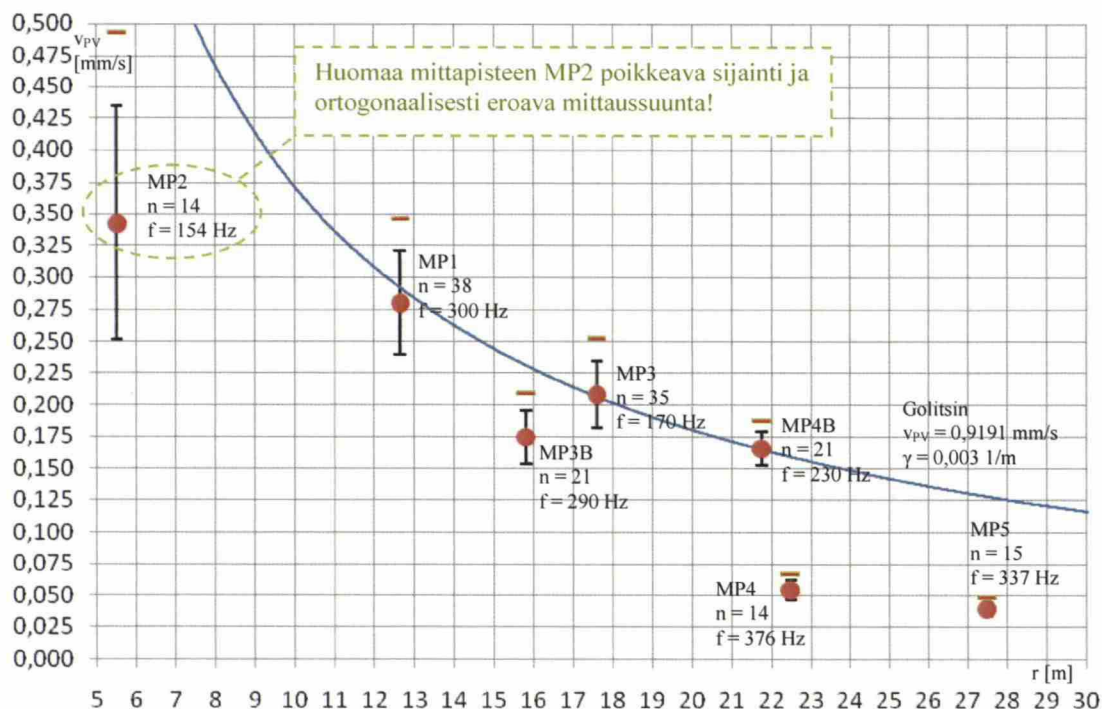
Nopealla Fourier-muunnoksella (FFT) saadaan herätteestä laadittua kuvaaja taajuustasossa (kuva 40). Spektristä käy ilmi metrojunan aiheuttamat kaistat, joista tavanomaisella matkalla 35 Hz – 80 Hz muodostuu merkittäväksi. Spektri sisältää terävän piikin, joka selvästi dominoi värähtelyn nopeustasoa ja joka kasvattaa tärinän tehollisarvoa erittäin voimakkaasti. Piikki on kohtalaisen korkealla taajuudella, joten on odotettavissa, että tärinä sillä taajuudella ei kykene etenemään kovin pitkälle, ellei materiaalivaimennus ole poikkeuksellisen vähäistä. Jos oletetaan, että 154 Hz on ratarakenteen ominaistaajuus, tulisi sen alapuolella olevien taajuuksien olla jonkin verran vahvistuneita ja sen yläpuolella olevien taajuuksien merkittävästi heikentyneitä. Kuvan perusteella näin vaikuttaisi olevan, mikä edelleen vahvistaa oletusta, että 154 Hz on ratarakenteen ominaistaajuus.



Kuva 40. Tyypillinen metrojunan pystysuuntaisen värähtelyn spektri (taajuusalueella 0 Hz – 250 Hz ilman ikkunointia)

Kampista saatu värähtelyn heilahdusnopeuden huippuarvojen tilastollinen etenemiskuvaaja on esitetty kuvassa 41 (tarkempi kuva on työn liitteenä F). Kuvaan on piirretty myös Golitsinin laajennetun muodon kaavan 18 ennustama värähtelyn eteneminen. Parametreina on käytetty geometrisella kertoimella huomioitua mittapisteestä MP4B takaisinlaskettua arvoa (0,919 mm/s etäisyydellä 4,12 m värähtelystä). Etäisyysvaimenemisen kertoimena (γ) käytettiin arvoa 0,003. Mittapisteen MP4B dataa käytettiin, koska sen vaihtelu oli pientä eikä se osalta ole syytä epäillä kallon virheen vaimentaneen värähtelyä.

Suuresta aineistosta valittiin ne yksittäiset mittaukset, joissa oli kunkin mittalaitteen osalta saatu tulos. Tämä otanta näytti suosivan sellaisia metron ohiajoja, joissa heräte oli ollut suuri, joten 15 suurinta herätettä kuuluvat varmasti joukkoon. Koska haluttiin tarkastella puristusaallon etenemistä, anturien MP2 ja MP8 osalta tarkasteltiin pystysuuntaista värähtelyä ja muiden anturien osalta pituussuuntaista värähtelyä. Korkeuseron aiheuttama geometrisen vaikutus on huomioitu käyttämällä trigonometrisia kaavoja. Korkeuseron vaikutus oli enimmillään suuruusluokkaa 2 %.



Kuva 41. Kampin koejärjestelyllä määritetty värähtelyn huippuarvojen eteneminen kalliossa. Kuvassa on esitetty keskihajonta (pystyviiva), 95 % fraktiili (ylempi vaakaviiva), mittausulosten lukumäärä (n) sekä hallitseva taajuus (f)

Kuvasta 41 nähdään, että lähikentässä värähtelyn eteneminen ei noudata teoreettista arvoa. Vaikuttaa siltä, että hyvälaatuisessa kalliossa vaimeneminen tapahtuu lähikentässä pikemminkin lineaarisesti (vaimentuminen 0,015 mm/s metriä kohden) kuin logaritmisesti. Kaukokentässä olevista mittaripareista (MP4-MP5 ja MP3B-MP4B) nähdään, että kauempana värähtelyn eteneminen noudattaa vaimenemislakia (eli kulmakerroin on melkein sama) hyvällä varmuudella.

Kalliolle lähikenttä on huomattavasti suurempi kuin maalajeille. Taajuudella 154 Hz, koko mitta-alue kuuluu lähikenttään. Taajuudella 300 Hz, lähikenttä alkaa noin 15 metristä. Värähtelyn etenemiskaava on laadittu siten, että se antaa hyviä tuloksia kaukokentässä, joten lähikentän mittaustuloksen käyttäminen lähtöarvoina johtaa huonoihin tuloksiin. Käytännössä lähikentän epävarmuus on niin suuri, että värähtelymittaukset (esim. koeräjäytys) ovat ainoa taloudellisesti järkevä tapa mitata värähtelyn toteutuva suuruus. Kaukokentässä saadut värähtelyn arvot ovat oikein, jos värähtelyn lähtöarvo on valittu sopivaksi ja matkalle ei osu mitään merkittäviä häiriöitä.

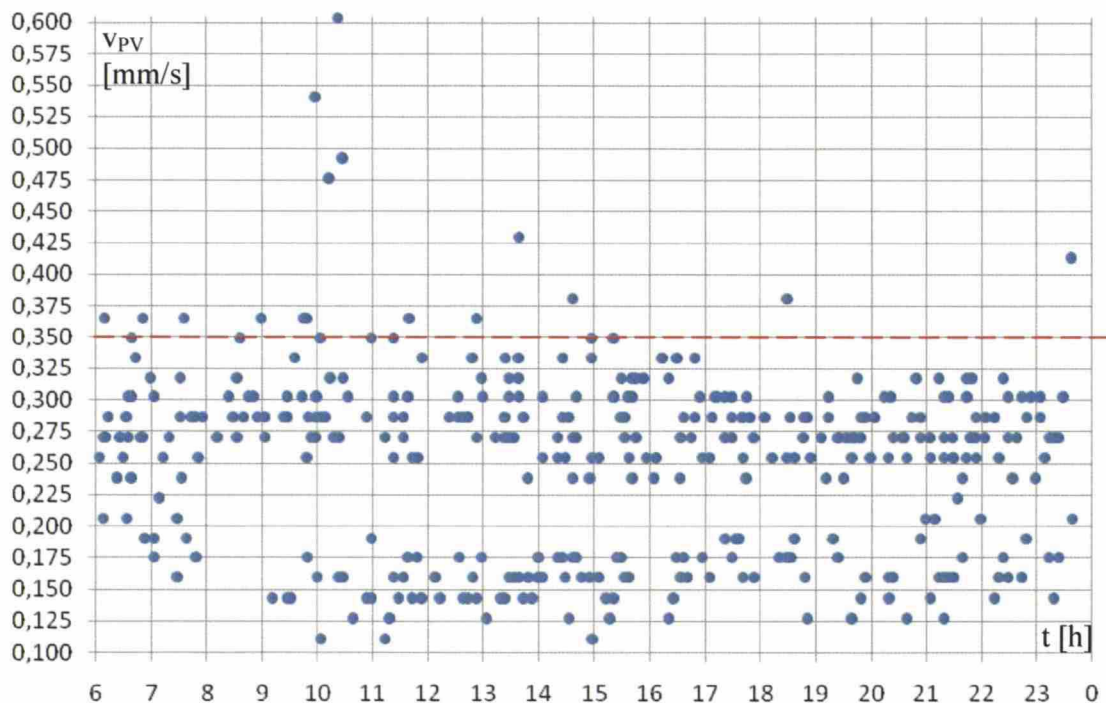
Lisäksi havaitaan, että lähikentässä tulosten hajonta on suurempi kuin kaukokentässä. Tämä tarkoittaa sitä, että lähikentässä myös mittausepävarmuuksien varmuuskerrointa on korotettava. Lähikentässä mittaustulokset voivat vaihdella jopa 20 % (keskihajonta), mikä tarkoittaa mittausepävarmuuden osakertoimen ($\eta_{M,NF}$) korottamista 1,2:sta 1,4:een, jotta se edelleen olisi 95 % -luottamustasolla varmalla puolella.

Tuloksista käy ilmi, että silmämääräisesti havaittu rakopinta MP1 ja MP3 välillä (kuva 31) on ummessa ja välittää värähtelyn eteenpäin lähes täysin vaimentumatta (vaimentuminen rakopinnassa vastaa normaalia rakovaimennusta). Sen sijaan MP3B:n alhainen tulos selittyy vain, jos tärinälähteen ja sen välissä on rakopinta, jota ei voitu pinnasta havaita. Tätä otaksumaa puoltaa myös energian jakautuminen S- ja P-aallon välillä suhteessa 1:1. Energian suhde viittaa siihen, että värähtely on läpäissyt häiriön kalliossa ja S-aalto on vaimentunut suhteessa enemmän kuin P-aalto. Käytännössä MP3B:n antamia tuloksia ei voida käyttää, koska ei ole selvillä mikä on aiheuttanut vaimentumisen. Tämä havainnollistaa hyvin kallion luonnetta mittauskohteena ja alleviivaa tarvetta käyttää useita antureita ja mitata tärinää useista suunnista.

Saatujen tulosten merkittävät taajuudet ovat (tärinänvaimennusrakenteiden ominaistaajuuksia ajatellen) melko korkeita. Tämä luo hyvät edellytykset vaimennusrakenteiden toiminnalle. Jo melko korkeankin ominaistaajuuden omaavat materiaalit vaimentavat korkeat taajuudet pois tehokkaasti. Ongelmaksi voi muodostua taajuuskaistalla 35 Hz – 80 Hz havaitun tärinän voimistuminen häiritsevälle tasolle. Tätä ongelmaa voi välttää käyttämällä vaimennusmateriaalia, jonka vaimennussuhde on mahdollisimman korkea.

Tärinän osalta MP3 17,6 metrin etäisyydellä metroraadasta antaa enää tärinän taajuuspainotetuksi tehollisarvoksi suurimmillaan 0,013 mm/s. Tämä on edelleen moninkertaisesti alle A-luokan raja-arvon (paras tärinäluokka eli tehollisarvo on alle 0,1 mm/s). Tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että metroliiikenne kalliotunnelissa ei välttämättä aiheuta tärinähaittaa ihmisille. Tärinän etenemistä voidaan kuitenkin käyttää, kun määritetään tärinähaittaa herkille laitteille tai toiminnoille. Tärinän arvoa tarvitaan myös, kun ennustetaan runkomelua rakenteiden sisällä. Käytännössä runkomelun haittavaikutuksen syntyminen edellyttää vähintään yhtä seuraavista ongelmista: voimistava interferenssi, resonoiva maakerros, resonoiva rakenne tai poikkeuksellinen hiljaiset olosuhteet.

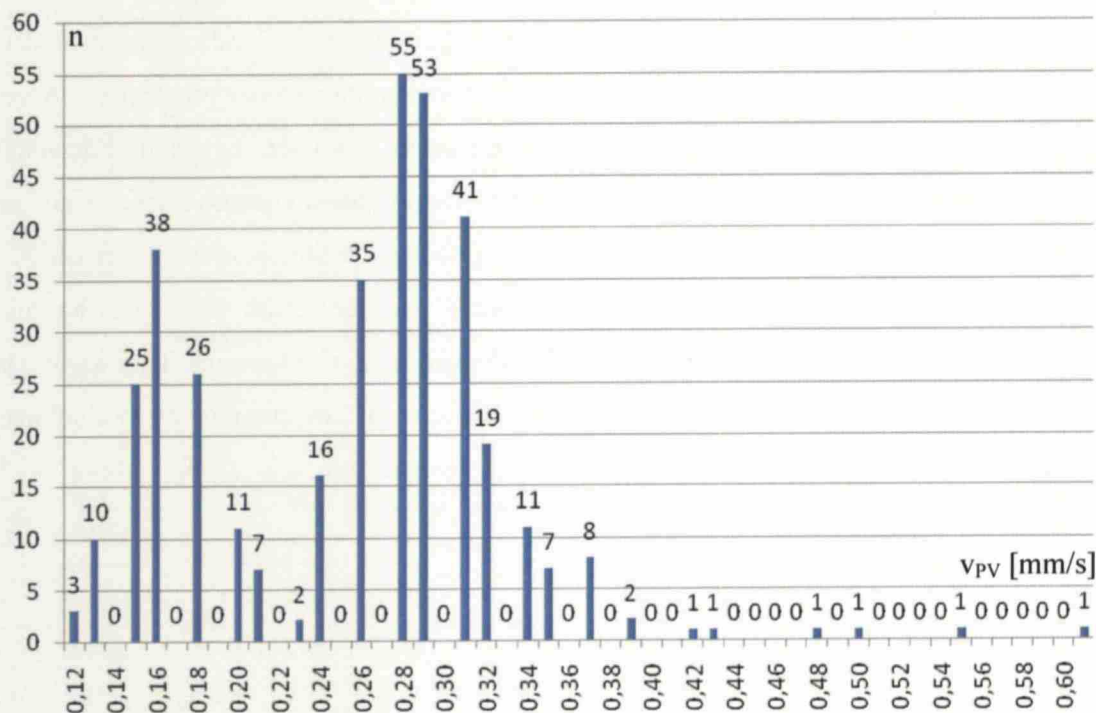
Kampin mittauksia suoritettiin eri kellonaikoihin eri arkipäivinä, metron painon (riippuen matkustajamäärästä) ja ajonopeuden vaihtelun vaikutuksen tutkimiseksi. Metrotunnelissa sijainneen lähianturin (MP2) tulosten vaihtelua kellonajasta riippuen on esitetty kuvassa 42. Kuvasta käy ilmi, että mittapisteen MP2 pystysuuntaisen heilahdusnopeuden arvo 0,350 mm/s ylittyy vain 16 kertaa 375 tapauksesta eli luottamustaso on 95,7 %. Arvon 0,375 mm/s ylittävät tulokset johtuvat häiriöistä (eri suuntiin ajavien metrojen yhdenaikainen ohitus, ulkopuolinen piikkimäinen häiriö, jne.). Alempi juova koostuu toiseen suuntaan kulkeneen metrojunan eli pohjoisradan tuloksista (etäisyys pohjoispuolen rataa oli 32,8 m). Kun arvoa halutaan käyttää lähtötietona kaavassa tai menetelmässä, joka ei huomioi lähikentän vaikutuksia, tulee sitä korottaa lähikentän geometrisella kertoimella, joka oli tässä tapauksessa 1,0988. Kampin tulosten perusteella metron aiheuttaman pystysuuntaisen värähtelyn muunnettu huippuarvo etäisyydellä 5,2 metriä on siis 0,385 mm/s 95 % -luottamustasolla.



Kuva 42. Metrotunnelin seinän anturin MP2 pystysuuntaisen värähtelyn huippuarvot

Metron osalta voi olla järkevää suorittaa mittauksia normaalin arkipäivän aikana usealta eri kellonajalta, jolloin 15 mitoittavimman tuloksen kuuluminen mittausjoukkoon on todennäköisempää. Toinen vaihtoehto on mitata aamu- tai iltaruuhkaa ja varmistaa suuri henkilö-

määrä ja ajonopeus. Tulosten perusteella 15 mitoittavimman tuloksen esiintyminen aamuruuhkassa saattaa olla aavistuksen verran todennäköisempää kuin iltaruuhkassa.



Kuva 43. Histogrammi pystysuuntaisen heilahdusnopeuden huippuarvoista (MP2)

Kuvasta 43 nähdään, että tilastollisesti jakauman kuvaamiseen (esimerkiksi 95 % -luottamustason määrittämiseksi tai Monte Carlo -analyysia varten) voidaan käyttää log-normal -jakaumaa tai normaalijakaumaa. Riittävän suuresta aineistosta voidaan määrittää 95 % -luottamustaso suoraan, kuten edellä on tehty. Saatu tulos on täysin analoginen jakauman muodon osalta norjalaisten rautatieliikenteen henkilöjunista määritettyjen histogrammien kanssa. (Turunen-Rise et al. 2002)

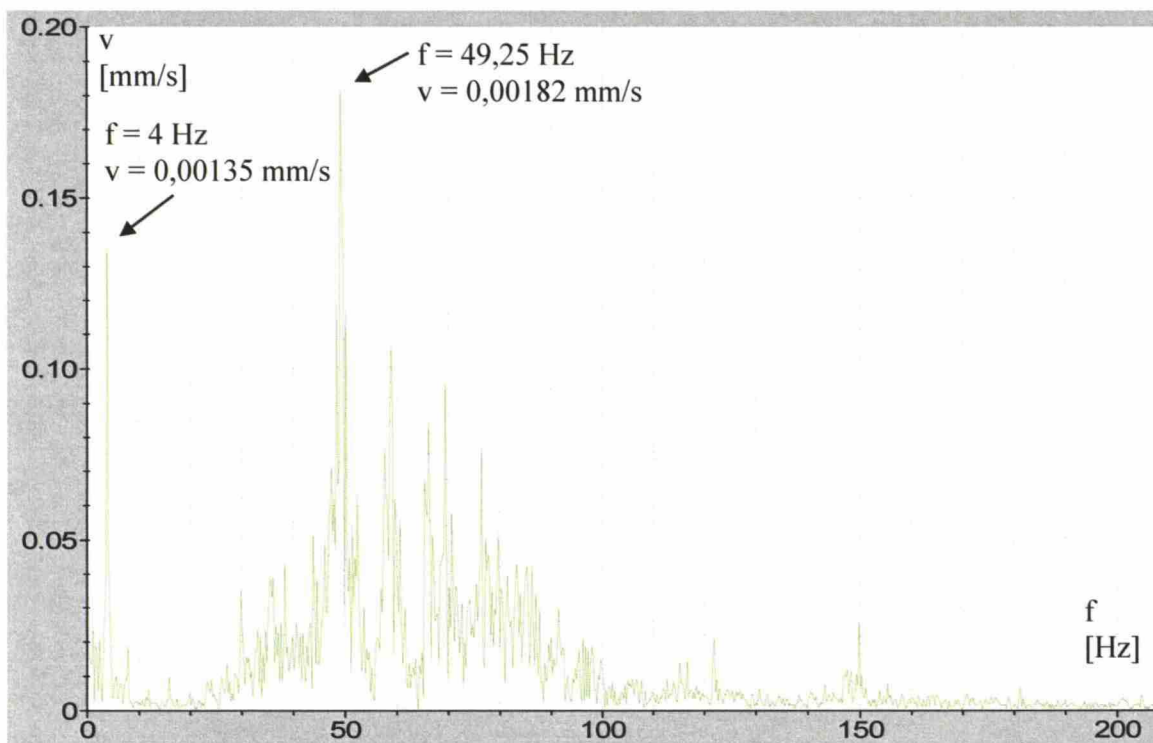
14.4 Esiselvitys Puotilantie 8:ssa

Kolmen eri rakennuksen kellareista mitattiin lineaarista äänenpainetasoa eikä metroa kyetty erottamaan taustatason joukosta. Joko alueelle asennettu kaksinkertainen tärinänvaimennusmatto toimii erittäin tehokkaasti tai metron aiheuttama heräte ei ole ollut merkittävä alun perinkään. Tärinänvaimennusmaton ominaistajuuden alapuolisten taajuuksien vahvistuminen saattaisi jäädä ihmiseltä havaitsematta, mutta äänenpainemittari huomaisi myös sen (lineaarisella painotuksella).

Kukin suoritettu mittausjakso sisälsi useita metroja (määritetty metron vuorovälistä). Mittauksia valvottiin läheisestä huoneesta, joten mittauksiin eksyneet häiriöt (normaalit asu-
misäänet) pystyttiin poistamaan. Mittauksista etsittiin eri tavoin metron vuorovälein toistu-
vaa signaalia, mutta edes lineaarisesta signaalista ei pystytty erottamaan mitään. Huoneissa
vallinneet taustamelutasot olivat suuruusluokkaa 19 dBA talossa A, 31,5 dBA talossa D ja
30 dBA talossa C (S-aikavakiolla). Mittaukset suoritettiin päätyvarastossa (talo A), pyörä-
varastossa (talo D) sekä väestönsuojassa (talo C).

14.5 Mittaukset Juorumäenkuja 1:ssä

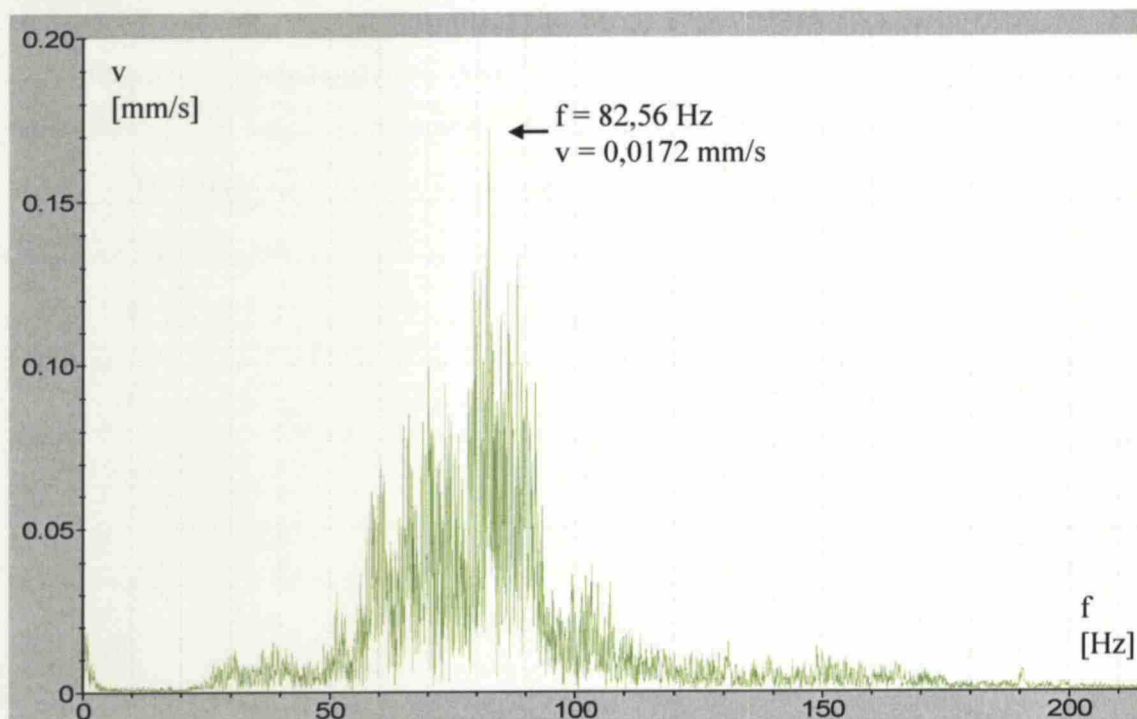
Anturin MP10 (kallionpaljastuma) osalta ei saatu ehjää dataa. Voi olla, että ensimmäisen
mittauspäivän kosteus aiheutti toimintahäiriön anturiin. Anturin MP11 (seinä) osalta met-
ron ohituksia ei pysty havaitsemaan kohinan joukosta. Anturin MP12 (lattia) datasta (kuva
44) metron ohitukset voidaan erottaa (nopeussignaalin huippuarvon voimistuminen 2,3-
kertaiseksi) ja välittyvä taajuusspektri havaita. Tärinän pystysuuntainen taajuuspainotettu
tehollisarvo oli suurimmillaan 0,0033 mm/s ja painottamaton huippuarvo 0,016 mm/s (taus-
tataso oli luokkaa 0,069 mm/s). Häiriöttömiä mittaustuloksia saatiin 23 kappaletta.



Kuva 44. Anturin MP12 pystysuuntainen värähtely metron ohittaessa (pystyasteikko on ja-
ettava sadalla, koska käytettiin X100-tarkkuusluokan anturia).

Äänenpainemittarista ei voida erottaa huoneeseen säteilevää runkoääntä, kun mitattiin lattiasta säteilevää runkoääntä (MP12 etäisyydeltä 1,2 m) tai seinästä säteilevää runkoääntä (MP11, etäisyydeltä 1,5 m). Huoneen A-painotettu taustataso vaihteli välillä 36,4 dB – 37,2 dB (S-aikavakiolla).

Ohuen maakerroksen päällä sijainnut anturi mittapisteessä MP13 sai ohi ajavista metroista signaaleja, jotka voitiin varmuudella vahvistaa metron tuottamiksi. Taajuussisällöltään anturin tulokset vastaavat Kampista ja anturista MP12 saatuja tuloksia. Kuvassa 45 on esitetty tärinän taajuussisältö. Mitatun (pystysuuntaisen) tärinän taajuuspainotettu tehollisarvo oli suurimmillaan 0,07 mm/s, mikä on vastaa parasta tärinäluokkaa A. Painottamaton huippuarvo oli suurimmassa mittauksessa 0,592 mm/s (taustataso oli luokkaa 0,024 mm/s). Yhteensä häiriöttömiä mittaustuloksia saatiin 14 kappaletta.



Kuva 45. Anturin MP13 pystysuuntainen värähtely metron ohittaessa (pystyasteikko on jaettava kymmenellä, koska käytettiin X10-tarkkuusluokan anturia).

14.6 Esiselvitys Asemamiehenkuja 2:ssa

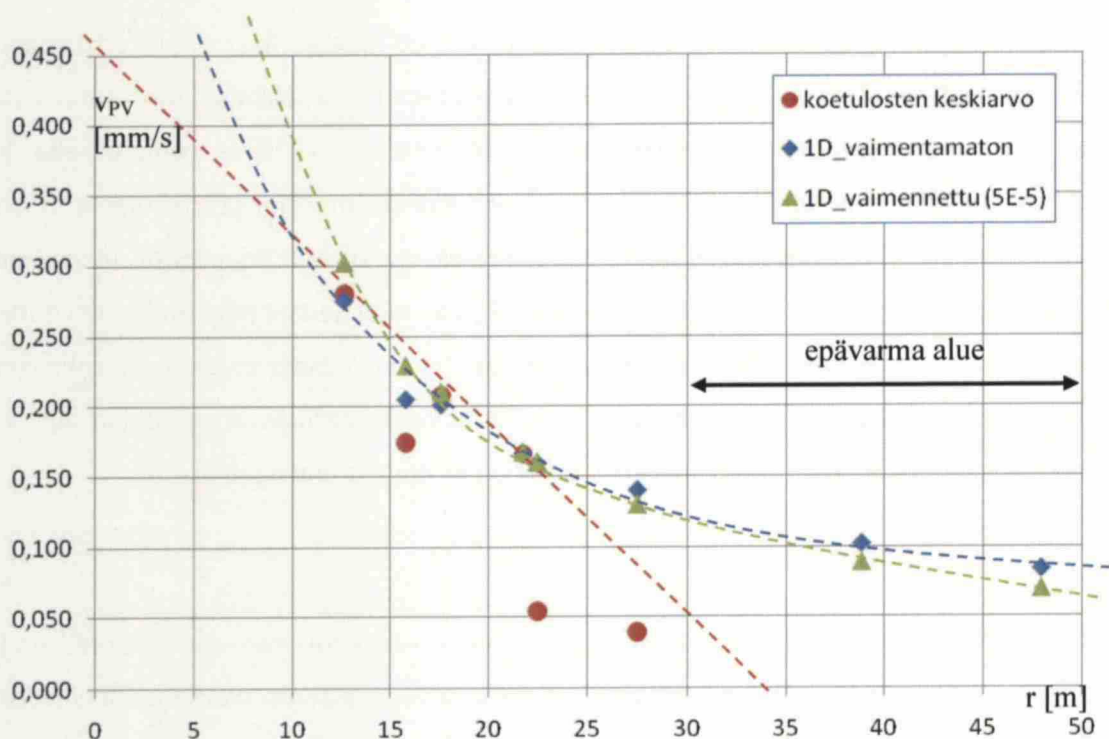
Alustavat mittaukset vaikuttivat hyviltä (äänenpaineessa havaittiin noin 6 dB nousu raitiovaunun ohituksen yhteydessä). Varsinaiset mittaukset järjestettiin siten, että pohjoiskäytävällä olleet ovet suljettiin (ks. kuva 35), valot sammutettiin ja avokonttoritilassa ei ollut mi-

tään häiriölähdettä (kaikki laitteet ilmastointia lukuun ottamatta olivat kiinni eikä tilassa oleskellut henkilöitä). Kun mittausjärjestelyä oli parannettu, ei äänenpaineen eroja enää voitu erottaa taustakohinasta (taustakohinan taso oli 39 dB – 41 dB A-painotuksella, S-aikavakiolla). Tämä mittaus osoittaa kuinka erehdyttävästi ilma-ääni ja runkomelu voivat muistuttaa toisiaan. Alustavassa mittauksessa kyseessä saattoi olla ikkunan tai ulkoseinän läpi suoraan välittyvä runkoääni. Ilmaäänien osuus pitää aina sulkea pois runkomelumittauksista joko vaihtelemalla mittaustapaa tai mittaamalla runkoääntä useassa eri kohdassa, koska sen etenemisreitti rakenteisiin ei kulje suunniteltavien värinänvaimentimien läpi. Ilmavälitteinen runkoääni on ulkoseiniä koskeva rakennesuunnitteluongelma.

14.7 Yksiulotteinen malli

Työn aikana kehitettiin menetelmää, jolla voitaisiin redusoida pois vapausasteita mallista ja siten joko nopeuttaa laskentaa tai tarkentaa tuloksia. Yksiaksiaalisen mallin kehitys jatkuu diplomityön jälkeen, mutta alustavat tulokset on sisällytetty työhön. Ennen kuin menetelmää voidaan hyödyntää luotettavien approksimaatioiden tekemiseen, se on saatava sekä spatiaalisesti että temporaalisesti stabiiliksi. Mallin antamia tuloksia voidaan pitää suuntaa-antavina ja niitä tulee käyttää varoen.

Kampin värinän etenemistuloksia (huippuarvojen keskiarvot) hyödyntäen oli mahdollista määrittää yksiaksiaaliselle mallille värähtelyn huippuarvon heräte, joka tuottaa 21,767 metrin päässä 0,166 mm/s suuruisen heilahdusnopeuden. Tätä herätettä (2,500 mm/s etäisyydellä 1,373 m) hyödyntäen voitiin laskea ennustettu värinätaso muissa mittauspisteissä. Samalla tavalla määritettiin heräte, kun materiaalivaimennus oli vähäistä ($\alpha = 0$ ja $\beta = 5E-5$), joka oli näillä parametreilla 5,000 mm/s etäisyydellä 1,373 m. Rayleigh-parametrien massaosuus (α) voitiin jättää kokonaan pois, koska se vaikuttaa vain, kun värähtelevän kappaleen ominaistajuus on alhainen. Alla olevassa kuvassa 46 on esitetty eri takaisinlaskennan parametreilla saadut tulokset.



Kuva 46. Yksiuotteisen mallin antamia tuloksia ja tulkinta etenemisestä

Alueelta 30 – 50 metriä ei suoritettu mittauksia, joten todelliset tulokset voivat olla sillä alueella mitä tahansa. Golitsin-malli (ks. kuva 41) sekä 1D-malli ennustavat, että 30 metrin jälkeen värinä vaimenee lähes lineaarisesti ja hyvin hitaasti. Tämä antaa olettaa, että värinän huippuarvon tulisi (keskimäärin) olla luokkaa 0,1 mm/s, jos malli kuvaa todellisuutta riittävän hyvin. Täyden varmuuden saavuttamiseksi edellytetään lisätutkimuksia.

Tämän yksittäisen koesarjan perusteella vaikuttaa siltä, että lähikentässä värinää voidaan mallintaa lineaarisesti vaimentuvana ja kaukokentässä luonnollisen logaritmin mukaisesti avulla vaimentuvana. Kampin heilahdusnopeuden huippuarvon keskiarvoja kuvaavat lähikentän ja kaukokentän yhtälöt ovat

$$\begin{aligned}
 v_{PV,mean}(r) &= 0,500 \frac{mm}{s} - 0,015 \frac{mm}{s \cdot m} \cdot r, & r \leq 20m \\
 v_{PV,mean}(r) &= 0,200 \frac{mm}{s} \left(\frac{20m}{r} \right) e^{-0,003(r-20m)}, & r > 20m
 \end{aligned} \tag{45}$$

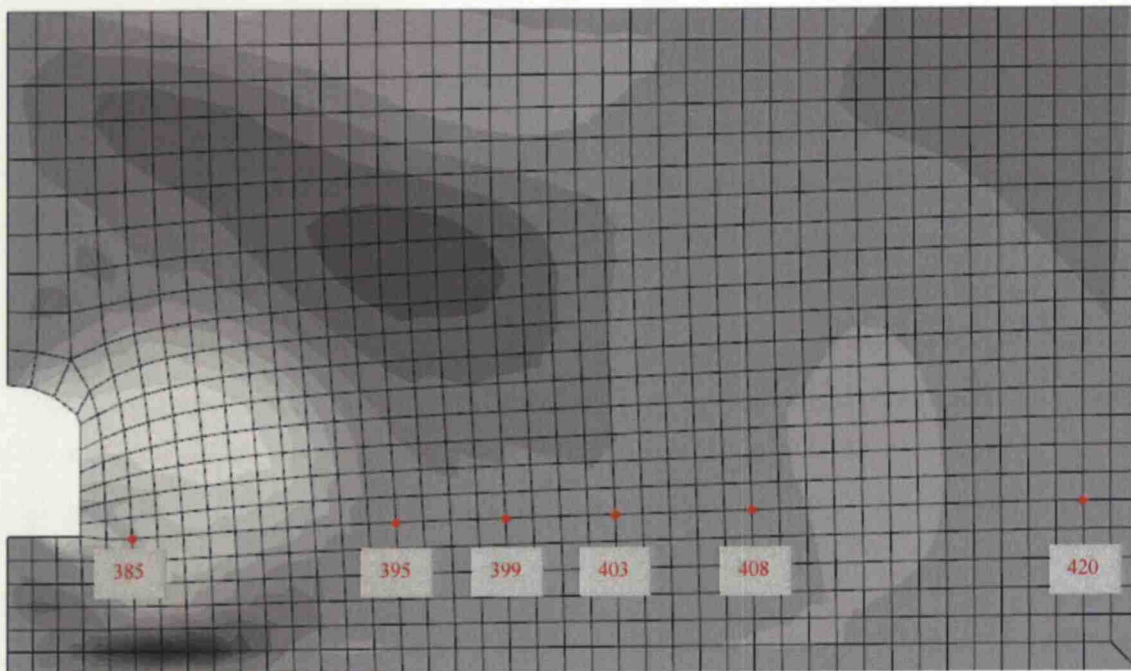
jossa r on lyhin etäisyys (m).

Yksiulotteisen mallin tuloksista huomataan, että ne ovat Golitsinin kaavan tyyppisiä. Tämä viittaa siihen, että kehitetty geometrisella vaimentumiskertoimella huomioitu 1D-malli kuvaa äärellistä 3D-avaruutta ja pystyy huomioimaan geometrisen vaimentumisen. 1D-malli vaikuttaa antavan oikean suuntaisia tuloksia. 1D-mallia voidaan tarkentaa siten, että myös ajasta riippuva kuorman vaihtelu mallinnetaan. Tällöin malli ei ole enää riippuvainen takaisinlaskennan datasta, vaan kuormitusfunktio voidaan syöttää herätteeksi ja huomioida ajoneuvon paino ja ajonopeus suoraan kuormitusfunktiossa, samaan tapaan kuin työssä meneteltiin aksisymmetrisen mallin osalta. Tämä puolestaan mahdollistaa menetelmän käyttämisen jo kaavoitusvaiheessa tai alustavan suunnittelun yhteydessä. Toinen vaihtoehto olisi löytää empiirinen yhteys herätefunktion ja yksidimensionaalisen mallin tarvitseman herätteen välille.

Excelillä toteutetusta yksiulotteisen mallin laskentapohjasta on esimerkki työn liitteenä H. Esimerkissä on näytetty aallon saapuminen takaisinlaskentapisteenä käytettyyn mittapisteseen MP4B etäisyydellä 21,747 m. Rayleigh-vaimennus on kytketty pois päältä asettamalla sen parametrit nolliksi. Saapumisajasta nähdään, että saatu tulos ei ole temporaalisesti stabiili. Temporaalista stabiiliutta voi parantaa laskemalla muunnetun aallonnopeuden elementteittäin, kuten liitteessä G on esitetty.

14.8 Aksisymmetrinen malli (Abaqus)

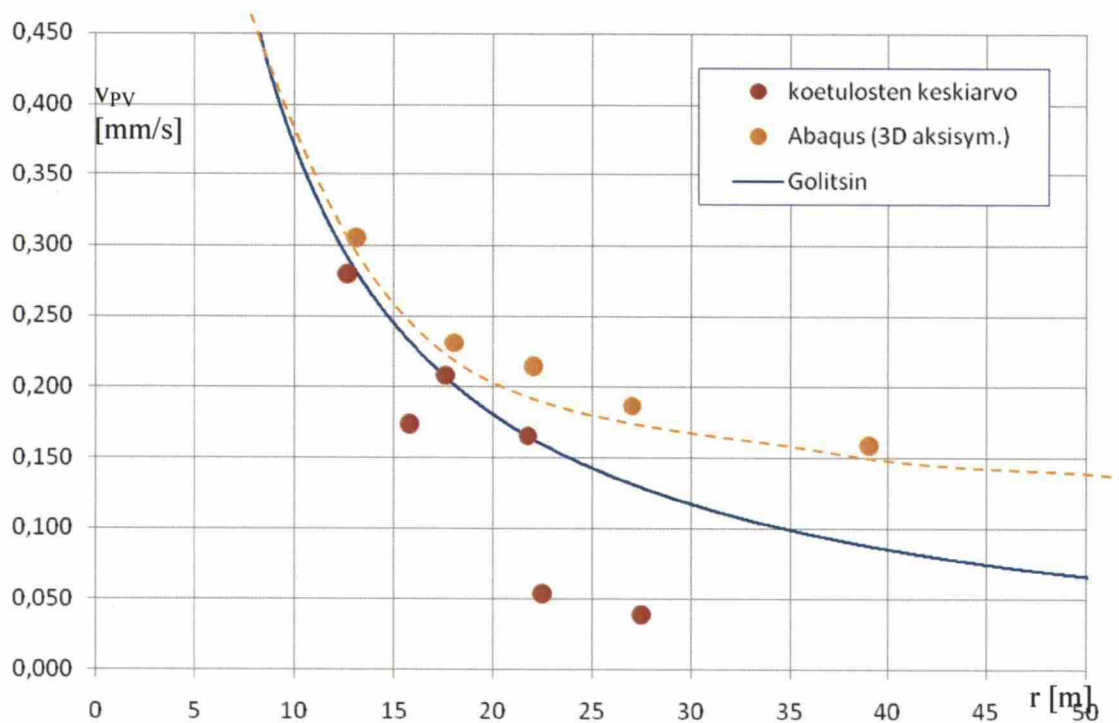
Kappaleessa 10.9 esitettyyn aksisymmetriseen malliin syötettiin junan akselipainon ja ajonopeuden (40 km/h) aiheuttama herätefunktio (periaate esitetty kappaleessa 10.3) paineiskuna (maksimiampplitudi 3584 N/m^2). Tuloksia tarkasteltiin solmuissa, joiden etäisyys vastaa mahdollisimman hyvin todellisten anturien sijaintia. Tarkastelupisteet ja niiden etäisyys mallin herätteestä on esitetty kuvassa 47 sekä taulukossa 25 ja mallista saadut tulokset kuvassa 48.



Kuva 47. Valitut tarkastelupisteet ja niiden etäisyys mallin origosta. Kuvassa on esitetty isoaluekarttana heilahdusnopeuden vaakakomponentti hetkellä $t = 0,3368$ s.

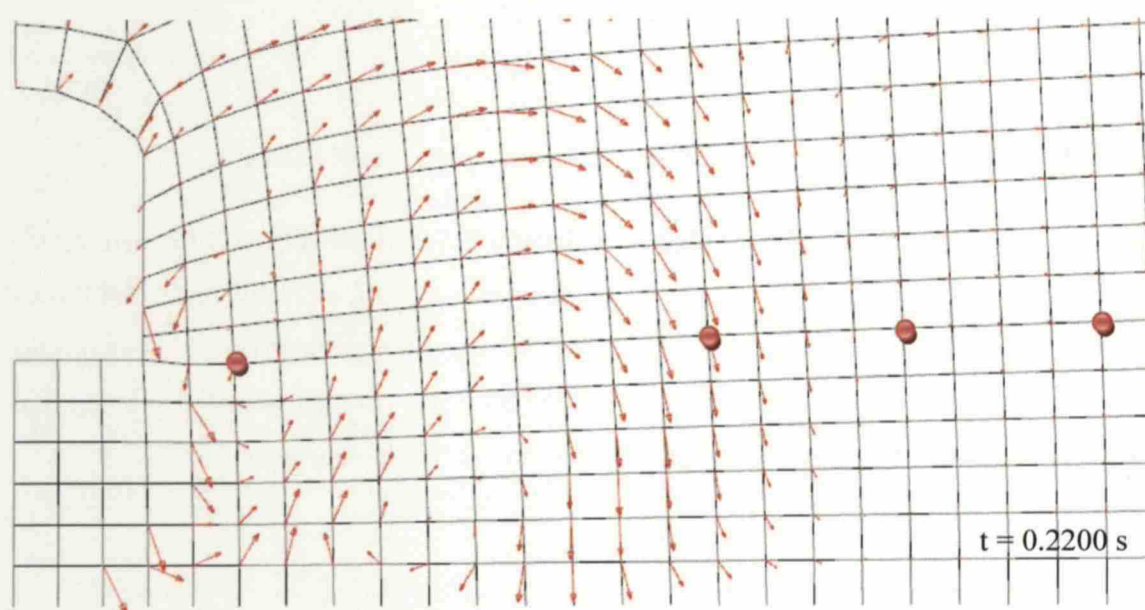
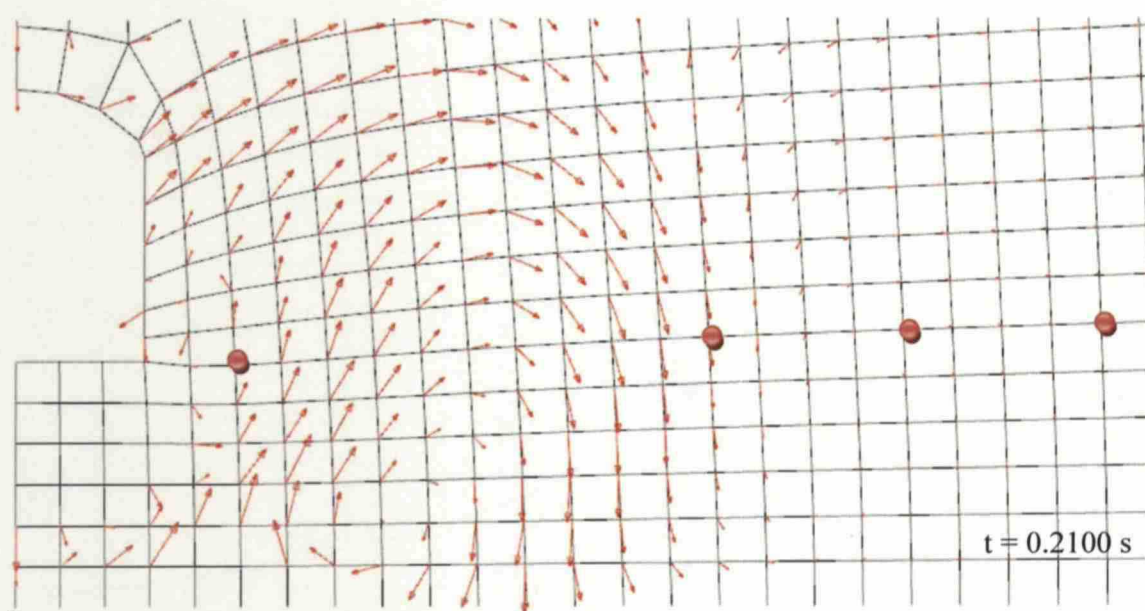
Taulukko 25. Tarkastelupisteiden etäisyys ja värinän huippuarvo

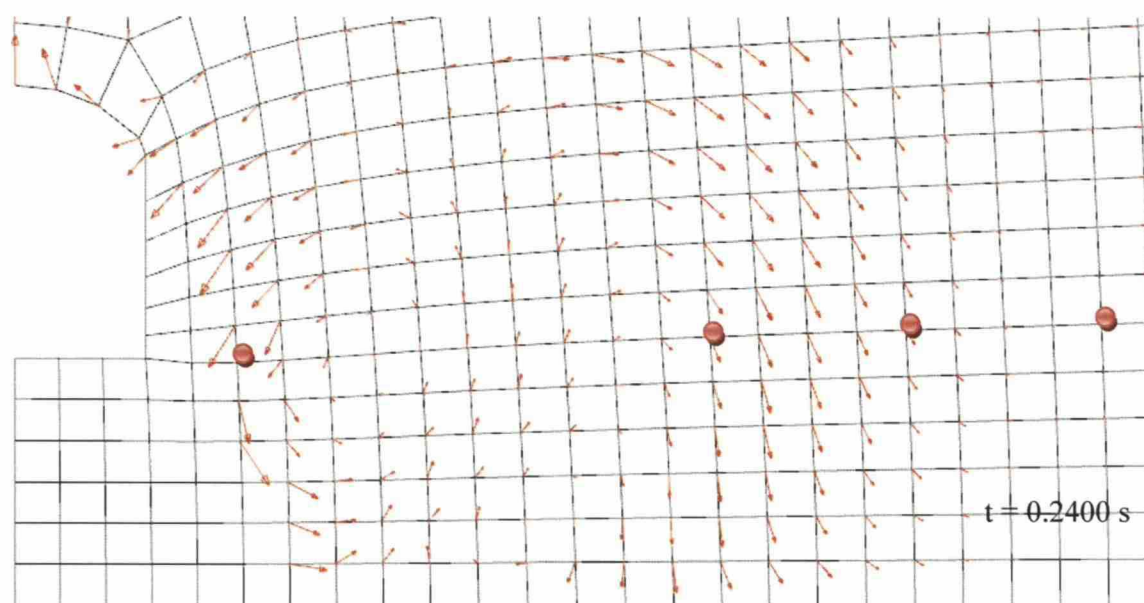
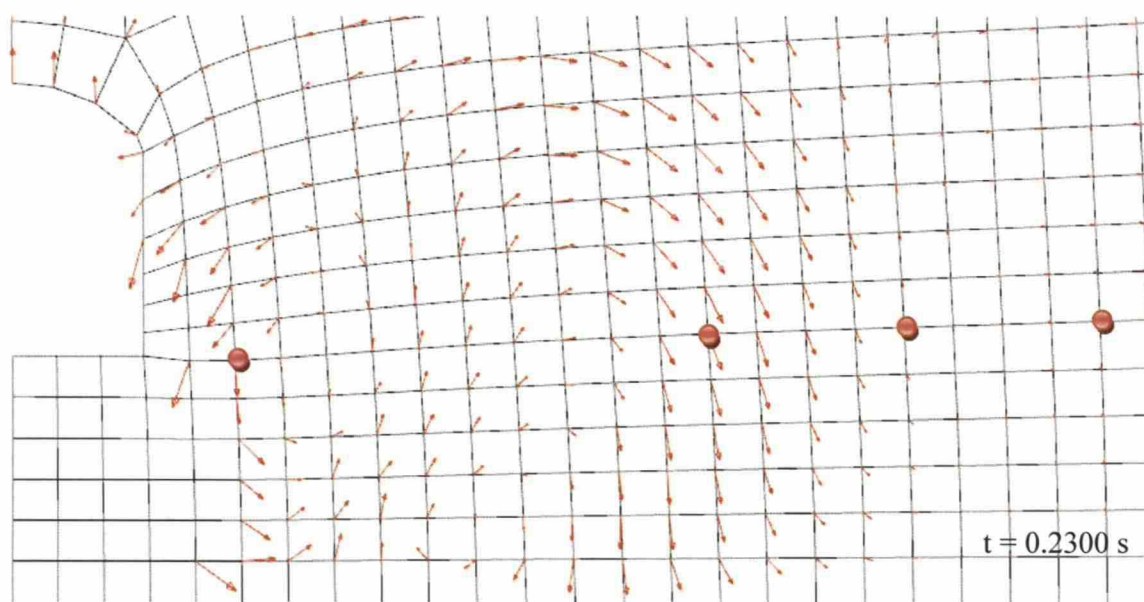
Solmu	Etäisyys r [m]	Värinän huippuarvo v_{PV} [mm/s]
NODE385	4,473	1,08
NODE395	13,072	0,31
NODE399	18,033	0,23
NODE403	22,025	0,21
NODE408	27,022	0,19
NODE420	39,017	0,16



Kuva 48. Abaqus-mallin antamat tulokset (lähikentän pistettä ei ole esitetty).

Lähikentässä tapahtuvia ilmiöitä on havainnollistettu kuvasarjassa 49a – 49d nopeusvektorien (eli paikkagradianttien) aikasarjan avulla. Kuvista käy ilmi, että lähikentän ilmiöt ovat monimutkaisia ja riippuvaisia lähikentän geometriasta. Ellei geometriaa voida mallintaa riittävän tarkasti, ei lähikentässä saada luotettavia tuloksia. Turbulenssi vaimenee nopeasti ja kaukokentässä tärinä etenee kuten yksinkertaisemmat mallit ennustavat.





2 ODB: tarinan_edit.odb ABAQUS/EXPLICIT Student Edition 6.6-2 Wed Nov 19 14:58:43 Normaalika 2008
3
Step: Step:1
Increment 47972: Step Time = 0.2400
Symbol Var: VT
Deformed Var: UT Deformation Scale Factor: +1.000e+00

Kuvat 49a – 49d. Heilahdusnopeuden vektorit neljänä eri laskentahetkenä lähikentässä

14.9 Tutkimusongelmat

Mittausteknisesti metron aiheuttaman tärinän ja runkomelun mittaaminen aiheuttaa suuria vaatimuksia mittalaitteistolle. Useimmat mittalaitteet on tehty metron aiheuttamaa herätettä suuremman värähtelyn tutkimiseksi. Huomioita tulee kiinnittää mittalaitteen erottelukykyyyn

(engl. *resolution*) sekä alarajaan. Tärinä tapahtuu tavanomaisesta poikkeavan alhaisella taajuusalueella. Erityisesti äänenpainemittarin osalta on syytä tutkia, kykeneekö se mittaamaan infraääniä (< 20 Hz) ja mikä on mittarin oma melutaso alhaisilla taajuuksilla. Valmistajalta pitää selvittää myös mittalaitteen tekemä virhe, tarkkuusalueet sekä käytetty kalibrointistandardi. Mittaukset voidaan suorittaa amplitudista, heilahdusnopeudesta tai kiihtyvyydestä sillä nämä suureet kytkeytyvät toisiinsa ajan välityksellä. Mittalaitteen tulee pystyä suureen näytetaajuuteen sillä kallioperässä tärinät tapahtuvat suurilla taajuuksilla ja voivat edettä kymmeniä kertoja nopeammin kuin maamassoissa.

Vaatimukset ovat kovat myös mittauspaikan suhteen. Toisaalta mittauspaikan pitää olla metrorataa edustava, mutta toisaalta ympäristön häiriöt eivät saa tulla esteeksi. Koska metron aiheuttama heräte on vähäistä, ovat tällaiset mittauspaikat harvassa. Mentäessä maanalle, mittauspaikan löytyminen vaikeutuu entisestään, koska mittauksen on suoritettava toisesta tunnelista. Etäisyys metrorataan ei saa kasvaa liian suureksi, koska mitattava tärinä on pientä ja vaaraksi nousevat ympäristön aiheuttamat häiriöt. Mitattavan tärinän ja taustakohinan suhteelle on myös asetettu vähimmäisvaatimus 3:1 standardissa NS 8176. Työssä löydetty mittauspaikat Kampin metroaseman läheisyydessä sekä Puotilassa metrotunnelin suuaukolla täyttävät nämä vaatimukset ja mittaukset voidaan toistaa siellä.

Kun laskennan tulee olla mahdollisimman tarkka, tarvitaan kiviläynteistä määritettyjä laboratoriokokeita. Mikäli tällaisia ei ole saatavilla valitulta mittauspaikalta, ne pitää teettää. Sama koskee myös maaperänäytteitä mittauspaikoilla, joissa rakennus sijaitsee maanvaraisesti tai paalujen varassa. Koska laskenta edustaa ideaalitapausta ja materiaalin heikkoudet pyritään ottamaan huomioon materiaaliarvoissa, saatu tulos edustaa tärinän maksimi-arvoja ideaaliolosuhteissa. Numeerisessa laskennassa lisähaasteeksi tulee ratkaisun stabiilius, joka on aina tutkittava. Laskettaessa ajasta riippuvaa herätettä tiheäverkkoisessa kolmiulotteisessa avaruudessa tai aksisymmetrisessä avaruudessa laskenta-aika voi kasvaa hyvin pitkäksi.

Mittaustulosten analysointi on hidasta, koska jokainen mittauksen tulos tulee tarkistaa. Mittauksiin tulleet virheet pitää poistaa aineistosta etteivät ne siirry tuloksiin. Luonnollisia häiriötilanteita (esim. kahden vastakkaissuuntaan kulkevan metron ohitus) ei pidä poistaa, sillä ne edustavat haitan epäsäännöllistä luonnetta. Tarvittaessa mittarin nollassa voidaan joutua tarkistamaan. Jotta standardin NS 8176 raja-arvoja voidaan käyttää, tulee aineiston sisältää

15 suurinta herätettä. Mikäli käytetään suurempaa aineistoa, voidaan 5 % epäedullisempi fraktiili määrittää tilastollisesti. Mittausajan osalta voidaan käyttää harkintaa, metron osalta mitatulla ajanjaksolla ei ole suurta merkitystä. Mittaajien tulee olla mittauspaikan läheisyydessä tai tallentaa häiriölähteet digitaalisesti, että virheet voidaan luotettavasti huomioida.

Mittaustuloksia raportoitaessa pitää selvästi ilmoittaa mitä värähtelykomponenttia on mitattu (pystysuuntainen, vaakasuuntainen, pituussuuntainen vai resultoiva värähtely). Perinteisesti on totuttu esittämään tärinän huippuarvoja, mutta standardin NS 8176 raja-arvot on määriteltävä tärinän nopeuden ja kiihtyvyyden tehollisarvoille. Mittausten toistaminen on mahdollistettava, että laitteistojen sekä mittaustavan erilaisuudesta johtuvaa virhettä voidaan myöhemmin tutkia.

15 LUOTETTAVUUSANALYYSI

15.1 Värähtelymittausten luotettavuus

Työn päätulokset perustuvat Kampista saatuihin mittaustuloksiin. Saatuja tuloksia voidaan suuren tulosmäärän perusteella pitää tilastollisesti luotettavina. Niitä ei voida kuitenkaan otaksua vielä vahvistetuiksi tosiasioiksi. On mahdollista, että metrotunnelissa sijainneiden anturien ja huoltotunnelissa sijainneiden anturien välillä olevassa kalliomassassa on vaihteleva rakopinta, ruhje tai jokin muu aallon kulkuun vaikuttava tekijä. Systemaattisen virheen aiheuttaa myös, jos kalliomassan kimmomoduuli tai tiheys muuttuu mittausalueella oleellisesti. Tilastollisesti näiden tekijöiden mahdollisuus on pieni, mutta ilman kalliönäytekairauksia asiasta ei voida varmistua.

Itse mittalaitteiden sisäinen virhe voi valmistajan ilmoituksen mukaan olla jopa $\pm 0,5$ mm/s (virhe on määritetty standardin DIN 45669-1 mukaan). Koska mittauksessa käytettiin useaa anturia ja ne antoivat samansuuntaisia tuloksia kohtuullisen pienellä virhemarginaalilla, on valmistajan ilmoittama virhe todennäköisesti tässä tapauksessa liioiteltu. Signaalit käsiteltiin nollaviivan tasauksella, joten kyseessä ei voi olla kalibraatio-ongelma. Anturityypin yhteinen systemaattinen virhe jää edelleen mahdolliseksi ja VTT:n tutkimusten valossa saattaa osoittautua merkittäväksi. Tässä työssä määritettyjä tuloksia ei suositella käytettäväksi muun valmistajan antureilla, ellei ensin varmistuta siitä, että anturien tulokset ovat

riittävän lähellä toisiaan tai ero on systemaattinen ja määritettävissä, jolloin se voidaan huomioida tuloksissa.

15.2 Numeerinen stabiilius

Numeeristen menetelmien käyttöön liittyy aina epätietoisuus ratkaisun oikeellisuudesta. Ratkaisun oikeellisuuden mittana käytetään ratkaisun stabiiliutta. Ratkaisun stabiiliudella tarkoitetaan sitä, että mallin antama tulos on riittävän lähellä oikeaa tulosta. Stabiiliutta voidaan tutkia varioimalla lähtöarvoja vähän, jolloin myös ratkaisun tulee muuttua vain vähän²². Stabiiliudesta voidaan varmistua elementtijakoa tihentämällä tai aika-askelta lyhentämällä, jolloin ratkaisu ei saa muuttua oleellisesti. Numeerisella stabiiliudella on kaksi luonnetta: aika (temporaalinen) ja avaruus (spatiaalinen). Avaruudellinen epästabiilius voi ilmetä vääränä aallonmuotona, aallonmuodon epätarkkuutena, amplitudin (paikka, nopeus tai kiihtyvyys) epätarkkuutena tai geometrisina virheinä. Ajallinen epästabiilius voi merkitä väärää aallonnopeutta, saapumisaikaa, saapumisaikaeroa tai aallonmuotoa aika-akselilla.

Spatiaalinen epätarkkuus syntyy, kun mallin elementit eivät pysty ottamaan sitä aallonmuotoa, mitä rakenne oikeasti noudattaisi. Tällöin elementit hakevat sitä lähinnä olevan aallonmuodon (minimienienergiaperiaatteesta johtuen) ja näiden kahden erotus on mallin tekemä virhe. Joissain tapauksissa tämä virhe voi kumuloitua ja tällöin pienikin virhe saattaa kasvaa merkittäväksi lopputulosta tarkasteltaessa. Ongelma koskee erityisesti S-aaltoja ja R-aaltoja, koska ne ovat hitaampia kuin P-aallot. Koska aallonpituus riippuu käänteisesti taajuudesta, ovat nimenomaan korkeat taajuudet vaarassa tulla mallinnetuiksi väärin. Elementtimäärän kasvattaminen lisää laskenta-aikaa, joten on riittävää, että saavutetaan riittävä tarkkuus. Kappaleessa 10.8 on esitetty, että voidaan käyttää 8 elementtiä mallin lyhintä aallonpituutta kohti (Hall 2000 viitaten Lysmer 1978). Käytännössä mallin spatiaalinen stabiilius voidaan kuitenkin varmistaa paremmin tuplaamalla elementtijako ja katsomalla muuttuko tulos merkittävästi. Kun tulos ei enää muutu merkittävästi, on saavutettu spatiaalinen stabiilius.

Temporaalinen epätarkkuus syntyy, kun mallin aika-askel on suurempi kuin aika, jonka aalto matkaa mallin pienimmän elementin läpi. Elementtijako puolestaan vaikuttaa elementin

²² tämä käsite tunnetaan matematiikassa nimellä hyvin asetettu ongelma (Jacques Hadamard, 1865 – 1963)

pienimpään mittaan, mikä kytkee spatiaalisen ja temporaalisen stabiiliuden yhteen (spatiotemporaalinen stabiilius). Aika-askel voidaan kuitenkin määrittää myös avaruudellisista ominaisuuksista riippumatta mallin suurimman ominaiskulmanopeuden ja sitä vastaavan vaimennussuhteen avulla. Vaihtoehtoisesti valitusta aika-askeleesta voidaan määrittää ominaistaajuus, mihin asti mallin antamat tulokset ovat stabiileja. Mallin temporaalista stabiiliutta voi parantaa valitsemalla vaimennusmatriisi, joka suodattaa epästabiilit korkeat taajuu-
det pois tai lyhentämällä aika-askelta. (Hall 2000) Temporaalisen stabiiliuden voi todeta esimerkiksi puolittamalla aika-askeleen ja toteamalla, että tulos ei (ajan suhteen) muuttunut merkittävästi. Kun etäisyys tarkastelupisteeseen ja aallon etenemisnopeus tunnetaan, voidaan myös saapumisaikaa käyttää approksimaationa mallin temporaalisesta tarkkuudesta.

Koska numeerisesti saadut arvot kuvaavat ideaalitulannetta, riittää, että numeerinen stabiilius on kohtuullisen hyvä. Numeerisesti määritetyt arvot antavat yleensä yläraja-arvion tärinälle, mutta eivät ota huomioon interferenssin vaikutusta (tärinän summutuminen tai eliminoituminen) tai paikallisten resonanssien ja geometrian vaikutusta. Yksiaksoaalisen mallin osalta riittävää numeerista stabiiliutta ei saavutettu vaikka tulokset mukailevatkin todellisia arvoja sekä muiden teorioiden ennustamia arvoja.

15.3 Stokastinen luotettavuus

Värähtelyanalyysiin liittyy lukuisia epävarmuustekijöitä joiden välinen yhteys saattaa olla summaus tai tulo. Tulovaikutuksen tapauksessa pienetkin (0 % ... 10 %) epävarmuustekijät saattavat johtaa siihen, että analyysin kokonaisvarmuus on heikko. Esimerkiksi viiden pienen epävarmuuden tulovaikutus on jo noin 30 %, joskin yleensä näiden virheiden oletetaan olevan normaalijakautuneita, jolloin vastakkaiseen suuntaan tapahtuvat virheet tasaavat toistensa vaikutusta. Taloudellisesti ajatellen analyysin virhe saa olla enintään 50 % tai kovin tarkkaa analyysia ei kannata edes tehdä.

Norjalaisen standardin NS 8176 (2005) mukaan värähtelymittausten epätarkkuus on 20 % ja Huhtalan (2006) diplomityössä havaittujen epätarkkuuksien mukaan tämä arvo näyttäisi pitävän hyvin paikkansa. Myös tässä työssä kohdatut epävarmuustekijät ja useilta eri päiviltä ja ajankohdilta kerrytetty data johtavat mittausepätarkkuuden osalta tulokseen 15 % ... 25 % (sisältäen myös ulkoiset virhelähteet). Näiden perustelujen nojalla, esitettyä arviota

20 % voidaan käyttää. Käytännössä tämä tarkoittaa siis, että todellinen tulos on 95 % -luottamustasolla 0,8 ... 1,2 -kertainen mitattuun verrattuna. Mitoituksessa tämä on huomioitava kertoimella (η_M) 1,2. Jos mittauspaikalta on määritetty tilastollista aineistoa, josta käy ilmi keskiarvo ja keskihajonta, voidaan käyttää tilastollisesti määriteltyä kerrointa, joka vastaa 95 % -luottamustasoa eli ominaisarvoa.

VTT:n tutkimuksissa (Tukey 2008) on käynyt ilmi, että myös tärinää mittaavien laitteiden välillä voi olla jopa 17,1 % eroja mitattaessa värähtelyn nopeuden huippuarvoa. Mittalaitteen mittausvirhe selvitetään valmistajalta ja poistetaan tuloksesta käyttäen 95 % -luottamustasoa vastaavaa kerrointa ominaisarvon saamiseksi. Ihmiseen kohdistuvan tärinän mittalaitteita koskeva standardi ISO 8041 määrittelee nopeuden huippuarvon sallituksi virheeksi 4 % kalibrointitajuuksella ja viittaa kalibrointilaitteen mittausepävarmuuksien laskemiseksi standardin ISO 16063-21:2003 liitteeseen A. Näin ollen, jos käytetty mittalaite on standardin ISO 8041 mukainen, voidaan käyttää kerrointa ($\eta_{M,D}$) 1,04. Ellei ole syytä epäillä toisin, mittalaitteiden epätarkkuuden voidaan ajatella sisältyvän edellä esitettyyn mittausten epätarkkuuteen η_M .

Sijaintien mittausepä-tarkkuuden virhe voi olla enintään lähteen (MP0) ja lähipisteen (MP2) sekä lähteen (MP0) ja lähimmän etäpisteen (MP1) välisten mittausvirheiden summa. Lähipisteen virhe voi olla 0,024 % ja etäpisteen 0,079 %, eli yhteensä virhe voi olla noin 0,1 % suuruusluokkaa. Virheen vaikutus lopputulokseen on tuhannesosan luokkaa. Yleensä mittausepä-tarkkuuksien vaikutusta ei tarvitse huomioida mitoituksessa. Jos asennuspisteet mitataan ensin ja sen jälkeen suoritetaan anturien asennus, saatetaan asennusepä-tarkkuus joutua huomioimaan.

Jos kaikkia aallon etenemisnopeuteen kalliiossa vaikuttavia tekijöitä ei voida määrittää suoraan värähtelysignaaleista, huomioidaan myös määrittämismenetelmien virheen vaikutus aallonnopeuteen. Laboratoriokokeilla porausnäytteistä määritetyn kimmomoduulin tyypillinen vaihtelu (keskihajonta) kivilajin pysyessä samana on noin 10 %. Tällöin P-aallonnopeus voi muuttua 5 %. Mittauksilla laboratoriossa määritetty tiheys vaihtelee yleensä (kivilajin pysyessä samana) noin 1 % ... 2 %, mikä voi aiheuttaa P-aallonnopeuteen enintään 1 % muutoksen. Poissonin luvuksi saatava tulos voi vaihdella 0 % ... 3 % kivilajin sisällä, mikä voi aiheuttaa P-aallonnopeuteen enintään 0,7 % suuruisen muutoksen. Näiden

tekijöiden huonoin mahdollinen yhdistelmä voi aiheuttaa P-aallonnopeuteen enintään 6,7 % suuruisen muutoksen. Jos kukin tekijä otaksutaan normaalijakautuneeksi, mahdollisuus, että tämä oletus on konservatiivinen, on 99,6 %²³. Jos 95 % -luottamustaso riittää, voidaan käyttää alhaisempaa 2,3 % oletusta P-aallonnopeuden maksimivirheeksi²⁴. Tällöin P-aallonnopeuden kertoimen (η_p) arvona voidaan käyttää lukuarvoa 1,023.

Kun yksi tai useampi parametri määritetään mitatusta aallonnopeuksien saapumaerosta, tulee virhearviossa huomioida mittalaitteen näytteenottotaajuus, joka vaikuttaa (yleensä kaksi kertaa näytteen pituuden puolikas eli näytteenottojakson pituus sellaisenaan) aallonpituuden tai saapumisaikaeron määrittämiseen. Jos otaksutaan, että tyypillinen mittausetäisyys on 20 m ... 30 m, tiheys 2645 kg/m³ ja P-aallon etenemisnopeus on 4500 m/s, saadaan näytteenottotaajuuden vaikutukseksi 4,3 % (näytteenottotaajuudella 4096 Hz) aikaan. Jos mitataan kahden 10 m päässä toisistaan sijaitsevan anturin välistä saapumisaikaeroa, on vaikutus 10,8 % (4096 sps) ajasta. Kun nämä jaksonajan, saapumisajan tai saapumisaikaeron virheet huomioidaan aallonnopeuden laskennassa, saadaan 25 metrin etäisyydellä kimmomoduulin arvoon tulla pahimmillaan 17 % virhe, tiheyteen 15 % virhe tai Poissonin lukuun 15 % virhe. 10 metrin matkalta vastaavat virheet ovat 53 % kimmomoduulille, 35 % tiheydelle ja 41 % Poissonin luvulle.

Ajan määrittämisessä tehtyä virhettä voidaan pienentää kasvattamalla näytteenottotaajuutta, tarkastelumatkaa, anturien lukumäärää tai toistamalla mittaus (jolloin voidaan otaksua tulosten jakautuminen normaalijakauman mukaisesti eikä näytteenottotaajuuden maksimivirhettä tarvitse huomioida muuten kuin ylärajana). Näytteenottotaajuuden kaksinkertaistaminen 8192 näytteeseen sekunnissa tarkoittaa maksimivirhettä 8 % kimmomoduulille, 8 % tiheydelle ja 7 % kimmomoduulille 25 metrin matkalla. On tärkeää huomata, että näytteenottotaajuudella 8219 Hz, seismisesti kalliosta paikan päällä (*in situ*) määritetty kimmomoduuli on tarkempi kuin laboratoriokokeiden antama tulos diskreeteille kivinäytteille. Näytteenottotaajuudella 16384 Hz jopa 10 metrin matkalla saadaan kohtuullisen hyviä tuloksia; virhettä syntyy enää 10 % kimmomoduulille, 9 % tiheydelle ja 9 % Poissonin luvulle. Mitään yleispätevää kerrointa aikavirheelle ei voida antaa vaan sen osuus pitää arvioida, joka mittauksessa erikseen. Jos mittauksia toistetaan, voidaan tuloksena saatavan ajan olettaa

²³ $P(\text{arvoa ei ylitetä}) = 1 - [1 - P(X < 1,00)]^3 = 1 - [1 - 0,8413]^3 = 0,996003031$

²⁴ $P(\text{arvoa ei ylitetä}) = 1 - [1 - P(X < 0,34)]^3 = 1 - [1 - 0,6331]^3 = 0,950609532$

noudattavan normaalijakaumaa ja määrittää mittaustuloksista 95 % luottamustasoa vastaavat ominaisarvo (ominaisarvon minimiarvo eli 5 % -fraktiili sekä maksimiarvo eli 95 % -fraktiili).

Numeerisen mallintamisen virheenä voidaan pitää arviota ratkaisun stabiiliudesta ja huomioida se omalla kertoimellaan. Numeerinen malli ei pysty huomioimaan niitä paikallisia ominaisuuksia (geometria, rakoilu, heikkousvyöhykkeet, paikallinen resonanssi ja interferenssi), mitä malliin ei ole mallinnettu. Paikallisen vahvistumisen mahdollisuus tulee numeerista mallia käytettäessä arvioida erikseen ja ottaa huomioon kertoimella, joka takaa 95 % -luottamustasoa vastaavan ominaisarvon.

Kokonaisvirhettä värähtelynvaimennukselle on vaikea määrittää muuten kuin suurista tilastollisista aineistoista. Näin ollen ja johtuen eri tekijöiden vaihtelevasta merkityksestä lopputuloksen kannalta on suositeltavaa käyttää kerroinmenettelyä, jossa kunkin suureen osalta pyritään löytämään ominaisarvo (joka vastaa epäedullisempaa 5 % -fraktiilia). Tuloksena saatava arvo on värähtelyn ominaisarvo, jota voidaan käyttää käytettävyyden arviointiin käyttörajatilassa. Jos tuloksia on tarkoitus hyödyntää vaurioitumisen (esim. rakennevauriot ja laitteiston vahingot) arviointiin tulee käyttää varmuuskerrointa (γ_v) 1,7²⁵, jolloin saadaan värähtelyn mitoitusarvo. Korkeampaa riskitasoa käytettäessä voidaan käyttää varmuuskerrointa ($\gamma_{v,LOW}$) 1,6²⁶. Esitetty mitoitus tapa noudattaa Eurokoodissa SFS-EN 1990 esitettyjä periaatteita ominaisarvoille, mitoitusarvoille sekä luottamustasoille.

16 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimusten perusteella vaikuttaa siltä, että kalliotunnelissa kulkeva metro ei välttämättä aiheuta värähtelyä ihmisille. Mikäli rakennuksen perustamistapa on paalutus tai maanvarainen perustaminen, voi metro herättää rakenteen ja/tai maakerroksen ominaisuuksia, jolloin värähtely voi kasvaa havaittavalle tasolle. Metroradan rakenne ja metrojunan tuottama värähtely poikkeavat oleellisesti junaradan rakenteesta ja junan värähtelystä. Värähtelyn syn-
tymisen riskiä voidaan ajatella enemmän rakennuksen rakennesuunnittelukysymyksenä kuin radan vaimennuskysymyksenä. Olemassa olevien talojen ja rakenteiden osalta tulee

²⁵ Varmuuskertoimen arvo 1,7 vastaa noin 0,01 % esiintymistodennäköisyyttä, kun värähtelymittauksen virhettä pidetään merkittävimpänä virhelähteenä. Tällöin mitoitus epäonnistuu keskimäärin joka 10 000. kerta.

²⁶ Mitoitus epäonnistuu joka 1000. kerta

kuitenkin huomioida rakenteiden ja maakerrosten ominaistajuudet ja pyrkiä välttämään niitä. Tulevien rakenteiden osalta, on rakentaja velvoitettu mittaamaan rakentamispaikan värähtelyn merkittävimmät taajuudet ja välttämään niitä Suomen rakentamismääräyskoelman osan B3 mukaisesti.

Työssä ei kyetty todentamaan metron aiheuttamaa runkomeluhaittaa. Tärinää havaittiin runkomelua tuottavilla taajuuksilla, joten on mahdollista, että löytyy kohde, jossa metro aiheuttaa mittauskynnyksen ylittäviä äänitasoja. Juorumäenkuja 1:ssä suoritettut mittaukset (alle 30 metrin päässä tärinävaimentamattomasta metroradasta) kuitenkin viittaavat siihen, että kyseessä on pikemminkin resonanssin ja/tai interferenssin aiheuttama paikallinen ongelma. Erityisesti kallionvaraisesti perustetuissa rakenteissa tärinän vahvistumiselle tarjotaan niukasti mahdollisuuksia. Radan haarautumiskohta tai muu häiriö ratarakenteessa voi myös tuottaa paikallisesti korkeita arvoja. Sopivan paksuinen maakerros voi vahvistaa pysyvuuntaista tärinää ja paaluille perustetuissa tai korkeissa rakennuksissa vaakavärähtely voi kasvaa merkittäväksi. Haitta riippuu kohteen rakenteiden ja maakerrosten geometriasta, perustamistavasta, huoneen kalustuksesta ja käyttötavasta sekä haitan esiintymisen kellonajasta ja esiintymistiheydestä. Tilastollinen lähestymistapa haitan esiintymismahdollisuuden tutkimiseksi on suositeltavaa.

Lähikentässä (taajuudesta riippuen noin 15...30 metriä) tärinän eteneminen on monimutkaista ja erityisen altista geometrian muutoksille ja häiriöille materiaalissa. Tärinän mallintaminen tai teoreettinen laskentatapa eivät anna luotettavia tuloksia näin lähellä rataa. Työn tulosten perusteella tärinä on aina mitattava haitan tutkimiseksi lyhyillä etäisyyksillä rataa. Kauemmilla etäisyyksillä tärinä vaimenee hitaammin ja lineaarisemmin. Työn tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että lähikenttää kauemmilla etäisyyksillä työssä esitetyillä työkaluilla saadaan luotettavia tuloksia. Työssä mittaustuloksia ei tallennettu alueelta 30...50 metriä, joten täyttä varmuutta ei saavuteta ilman täydentäviä tärinämittauksia. Työn tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että metroradan aiheuttamat tärinähaittavähyhykkeet ovat jäämässä kapeiksi ja myös suoraan radan vaikutusalueelle voidaan rakentaa, kun rakentaja noudattaa voimassa olevia määräyksiä.

Kaukokentässä, kun geometriseen leviämiseen perustuva tärinän vaimeneminen vähenee, vaimenee tärinä lähes lineaarisesti etäisyyden suhteen. Tämä luo hyvät edellytykset tärinän

tilastollisten maksimiarvojen ennustamiselle rajallisilla etäisyyksillä radasta. Tilastollinen tarkastelutapa on tarpeen, sillä tärinän voimistuminen ja heikentyminen voi vaihdella paikallisesti huomattavasti. Tämän paikallisen vaihtelun huomioiminen vaatisi kohtuuttoman tarkkaa mallia ja valtavan määrän dataa, joten on käytännöllisempää ratkaista ongelma tilastollisesti. Mikäli värähtelypohjaista haittaa esiintyy paikallisesti, voidaan sitä yrittää ratkaista kohteeseen asennettavilla vaimennusratkaisuilla.

Työteknisesti ja taloudellisesti todetaan, että oikea asennusajankohta ratarakenteiden tärinävaimennukselle on, kun ratarakennetta rakennetaan tai korjataan. Tärinävaimennuksen epäonnistuminen johtaa pahimmillaan valtaviin taloudellisiin kustannuksiin, joten vaimennuksen epäonnistumiseen liittyvät riskitasot ovat suuria. Eurokoodiin sekä kansainvälisten organisaatioiden suosituksiin perustuen työssä annetaan suositeltavat arvot mitoituksen epäonnistumisen todennäköisyydeksi. Tilastollisen menettelyn perusteella (epäedullisempi 5 % -fraktiili) on voitu määrittää ominaisarvokertoimet osalle ongelman parametreista. Lisäksi rakennusten vaurioitumisen tutkimiseksi määritettiin kokonaisvarmuuskertoimeksi 1,7.

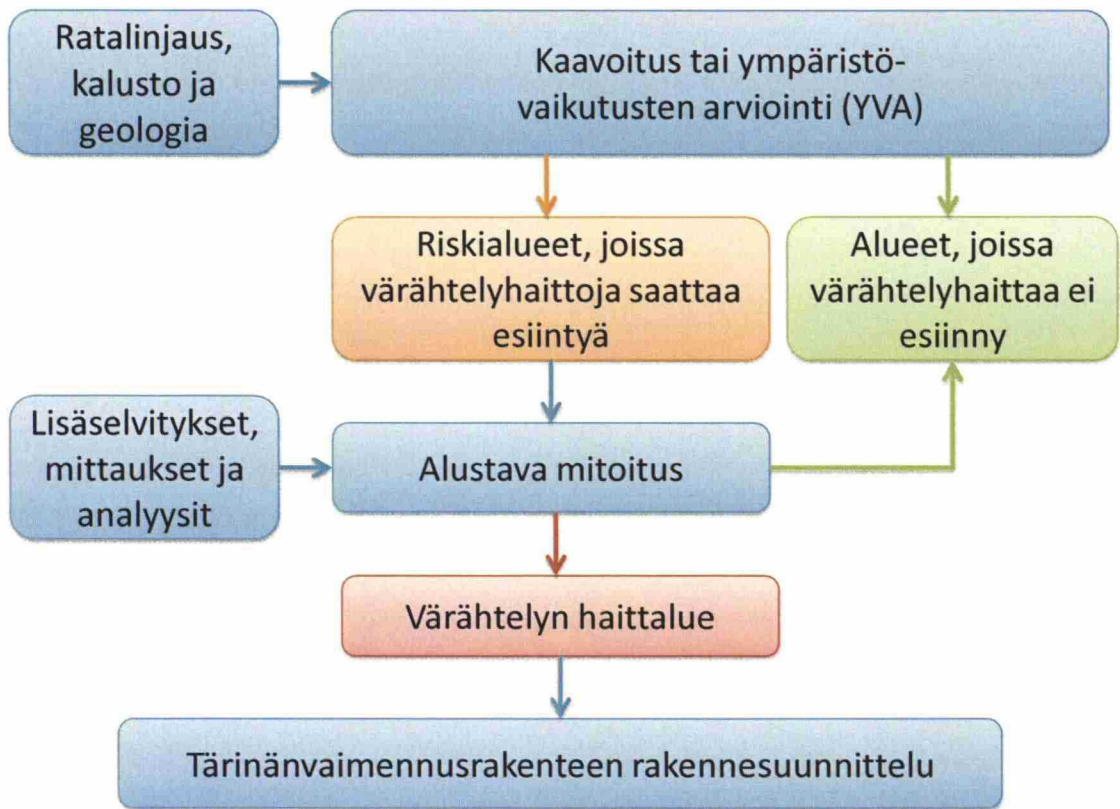
Koska työn on tarkoitus toimia perusteena tärinävaimennustarpeen arvioinnissa sekä vaimennusrakenteiden suunnittelussa, on tarkoituksenmukaista antaa osa johtopäätöksistä suosituksina. Suositukset perustuvat työssä selvitettyihin käytäntöihin, tutkimustuloksiin sekä työn tekijän henkilökohtaiseen arvioon.

17 SUOSITUKSET

17.1 Yleistä

Tässä työssä annetaan perusteet tärinäperäisten haittojen mitoittamiseen ja tärinävaimennusrakenteiden suunnitteluun. Työssä tutkitut mittaustulokset koskevat metron aiheuttamaa maksimaalista häiriötä. Metroradan tavanomaista herätettä valitessa ei siis voida käyttää Kampin mittaustulosten huippuarvoja tai tehollisarvoja. Tuloksia voidaan käyttää radan haarautumakohdissa tai kohdissa, joissa radassa on pistemäinen epäjatkuvuuskohta. Mittaustuloksia ei voida soveltaa junaliikenteeseen huomioimatta erilaista kalustoa ja ratarakennetta. Myös sovellettaessa tuloksia raitiovaunuliikenteeseen tulee noudattaa varovaisuutta.

Työssä annetaan suositukset kalliotunnelien rataliikenteen värähtelyhaitan raja-arvoiksi sekä suositus kaavoitukseen, ympäristövaikutusten selvittämiseen, alustavaan mitoitukseen ja rakennesuunnittelu.



Kuva 50. Tärinänvaimennusrakenteen suunnittelun vuokaavio

Kuten kuvassa 50 esitetään, on suositeltavaa selvittää ensin ne alueet radasta, joissa tilastollisen mallin mukaan (alustaviin lähtötietoihin perustuen) voi esiintyä tärinää. Nämä radan alueet otetaan tarkempaan tarkasteluun alustavassa mitoituksessa. Koska tässä vaiheessa voi olla käytettävissä enemmän lähtötietoja ja voidaan käyttää tarkempaa menetelmää, voi haitta-alue tarkentua tai saattaa selvitä, että haitta jää raja-arvojen alapuolelle. Mikäli alustavassa mitoituksessa määritetään alue värähtelyn haitta-alueeksi, tulee alueelle soveltuva vaimennusrakennesuunnitelma siten, että ratarakenne täyttää kaikki sen toimivuudelta edellytettävät ominaisuudet.

17.2 Raja-arvot

Työssä tehtiin kirjallisuusselvitys koskien kansainvälisiä raja-arvoja. Selvitystyön aikana ilmeni, että koska mitoituskriteerinä oli yleisesti häiritsevyys ihmiselle, on maakohtaisella geologialla ja rakennuskannalla suuri merkitys. Näin päädyttiin valitsemaan lähempään tarkasteluun pohjoismaat, joissa sekä geologia (Fennoskandian kilpi²⁷) että rakennuskanta ovat samantyyppisiä. Vaikka Suomi ja Ruotsi muistuttavat geologisesti enemmän toisiaan kuin Suomi ja Norja, suosittelen tärinän osalta käytettäväksi Norjan standardia (taulukko 26). VTT:n tutkimuksien tulokset viittaavat siihen, että Norjan standardin rajat pätevät myös suomessa. Jos VTT:n esittämää yhden viikon mittausaikaa halutaan käyttää, tulee ensin verifioida, että mittaustavan muuttaminen ei vaikuta raja-arvojen pätemiseen. Ruotsin tärinästandardi perustuu vanhaan versioon ISO 2631-1 standardista, jonka raja-arvot on myöhemmin peruttu. Sen sijaan Ruotsin runkomelua koskevat ohjeet ovat laadukkaat ja Iso-Britannian tekemillä parannuksilla niiden tarkkuutta voidaan entisestään parantaa. Runkomelun taso sisätiloissa voidaan ennustaa empiirisen yhteyden avulla heilahdusnopeuden tai kiihtyvyyden arvoista maan tai kallion pinnalla. Klæboen et al. (2003) tekemän tutkimuksen mukaan levon ja TV:n tai radion käyttämisen häiriintyminen on yhtä yleistä. Tämä tarkoittaa sitä, että tärinää koskevien raja-arvoja ei voida keventää ainoastaan päivällä tai illalla tapahtuvan häiriön tapauksessa ellei päivälle ja illalle sallita asukkaille suurempaa häirtäluokkaa.

Taulukko 26. Suositeltavat raja-arvot tärinälle (Talja 2004 ja NS 8176)

Raja-arvo	Luokka A Hyvät asuinolosuhteet. <i>Ihmiset eivät yleensä havaitse värähtelyjä</i>	Luokka B Suhteellisen hyvät olosuhteet. <i>Ihmiset voivat havaita värähtelyä, mutta ne eivät ole häiritseviä.</i>	Luokka C Suositus uusien rakennusten ja väylien suunnittelussa. <i>Keskimäärin 15 % asukkaista pitää värähtelyjä häiritsevinä ja voi valittaa häiriöstä.</i>	Luokka D Olosuhteet, joihin pyritään vanhoilla asuinalueilla. <i>Keskimäärin 25 % asukkaista pitää värähtelyjä häiritsevinä ja voi valittaa häiriöstä.</i>
$v_{w,95} [mm/s]$	0,10	0,15	0,30	0,60
$a_{w,95} [mm/s^2]$	3,6	5,4	11,0	21,0

Runkomelun (painottomaton) äänitaso saadaan kiihtyvyydestä kaavalla

²⁷ toiselta nimeltään Baltian kilpi

$$L_p = L_a + 15 \text{ dB} , \quad (46)$$

jossa L_p on äänenpainetaso rakennuksessa (re 20 μPa)
 L_a on pinnan kiihtyvyydestason tehollisarvo (re 10^{-6} m/s^2).

Jos sallittu taso ylittyy yhdelläkin terssikaistalla, voi runkomelu osoittautua ongelmaksi (taulukko 27). Jos melua syntyy vain päivällä (07 – 19), voidaan käyttää 5 dB korkeampia raja-arvoja. Kun melussa ei esiinny huippuja, voidaan käyttää 5 dB korkeampia raja-arvoja. Jos melua syntyy vain päivällä eikä melussa esiinny huippuja voidaan käyttää 8 dB²⁸ korkeampia raja-arvoja. Riittävän tasainen signaali voidaan tunnistaa joko 10 %:n ja 90 %:n fraktiilien erotuksesta (alle 5 dB) tai äänenpaineen muutosnopeudesta (FAST-painotuksella sekunnin aikana alle 10 dB/s).

Taulukko 27. Suositus äänenpainetasoiksi (DEFRA 2005 ja Socialstyrelsen 1994)

[Hz]	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250
L_{Aeq} [dB]	92	87	83	74	64	56	49	43	42	40	38	36	34	32	30

Paikallisten häiriöiden ja resonanssi-ilmiön vaara on aina arvioitava erikseen. Kun rakenne ja sen resonanssitaajuudet tunnetaan, voidaan painottamattoman äänitason määrittämiseen käyttää FTA:n kaavaa

$$L_p = L_v + 6 \text{ dB} , \quad (47)$$

jossa L_p on äänenpainetaso rakennuksessa (re 20 μPa)
 L_v on pinnan nopeustason tehollisarvo (re 50 nm/s)

ja huomioida resonanssitaajuudet lisäämällä niitä vastaaviin taajuuskaistoihin 6 dB.

Yllä esitetyt mitoittamistavat sopivat tavanomaisten kohteiden (esim. yksi- tai kaksikerroksisten pientalojen) tärinänvaimennuksen mitoittamiseen. Kohteet, joissa on erityisvaatimuksia, kuten herkäät laitteet, tulee aina arvioida tapauskohtaisesti. Äänenpainetasojen suositusarvot vastaavat karkeasti luokkaa B (alle 31,5 Hz taajuuksilla luokkaa A) ja 5 dB:n lisäys äänenpainetasossa muuttaa luokituksen luokkaan C tai 8 dB:n lisäys luokkaan D.

²⁸ 8dB vastaa kahta 5 dB samanaikaista korotusta

17.3 Kaavoitus ja ympäristövaikutusten arviointi

Kun tulevan radan linjaus ja syvyys kalliossa tunnetaan, on suositeltavaa ennustaa odotettavissa olevat häirtotasot (ja niihin liittyvät luokat A-D) stokastisilla menetelmillä. Rata voidaan diskretoida sopivin välein (esim. 10 metriä tai 20 metriä) ja arvioida kunkin diskretoidun kohdan poikkileikkausta. Yksi soveltuva stokastinen menetelmä on Monte Carlo -analyysi. Tämän tilastollisen analyysin tarkoituksena on löytää radan mitoittavat kohdat sekä tuotetun häiriön, että häiriintyvien kohteiden osalta. Näin tutkimusresurssit voidaan keskittää merkitseviin kohtiin ja radan vaimennusratkaisut kohdentaa ainoastaan niihin kohtiin, missä todellista haittaa on odotettavissa.

Käytettäessä Monte Carlo -analyysia kaavoitusvaiheessa tai ympäristövaikutusten arvioinnin, tulee arvioida tilastolliset jakaumat radan värähtelyä aiheuttavalle, kallion ja maan parametreille (tiheys, kimmomoduuli ja Poissonin luku) sekä rakennusten ja rakenteiden ominaisuuksille. Jos maakerroksen paksuutta ei tunneta luotettavasti, myös se on mallinnettava tilastollisesti. Analyysi etenee poikkileikkaus poikkileikkaukselta seuraavasti:

1. Arvotaan parametrit poikkileikkauskohtaisista tilastollisista jakaumista
2. Lasketaan värähtelyn eteneminen tarkastelupisteisiin
3. Ennustetaan runkomelun taso
4. Tarkistetaan ylittyivätkö raja-arvot ja kirjataan tulokset tietokantaan
5. Tarkistetaan onko tuloksia riittävästi tästä poikkileikkauksesta
 - a. jos on, siirrytään seuraavaan poikkileikkaukseen
 - b. jos ei, siirrytään kohtaan 1

Kun käytetään yksiaksiaalista mallia, on laskentakuorma riittävän kevyt koko ratalinjan analysointiin. Monte Carlo -analyysi tuottaa alustavan riskianalyysin koko ratalinjalta. Samalla selviää suunnitellun linjan vaikutus maankäyttöön värähtelyhäiriön vuoksi. Analyysissä havaitut riskialttiiden kohtien osalta voidaan suorittaa lisätutkimuksia ja niihin perustuen suorittaa tarkennettu analyysi. Tuloksia hyödynnettäessä on ilmoitettava niiden luotamus- tai riskitaso, koska se ohjaa suunnittelua ja valittuja ratkaisuja.

17.4 Alustava mitoitus

Alustavassa mitoituksessa laskentaa tarkennetaan kohteissa, joissa tärinähaittaa epäillään esiintyväksi. Alustavan mitoituksen tuloksena selviää vaimennustarve (syöttöhäviö) sekä rakenneratkaisut, joilla siihen päästään. Tarvittava vaimennus selvitetään siinä kohdassa tärinän etenemisreittiä, mihin vaimennus aiotaan asentaa. Yleensä on kustannustehokkainta vaimentaa tärinä lähteessä. Tätä varten sallittu taso (yleensä suositeltu raja-arvo) takaisinlasketaan lähteen herätteeksi, jolloin herätteen ja sallitun herätteen erotuksesta saadaan syöttöhäviö. Jos vaimennusta asennetaan havaitsijan luokse, lasketaan herätteestä ennustettu värähtelytaso havaitsijan luona ja raja-arvon sekä ennustetun arvon erotuksena saadaan vaadittu syöttöhäviö.

Kun vaadittu syöttöhäviö ilmoitetaan prosentteina ja rakenteen ja maan ominaistajuuudet tunnetaan, voidaan määrittää tärinänvaimennuksen ominaistajuuden ylärajalle approksimaatio kaavalla

$$f_{n,\max} = \frac{f_s}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{\mu}\right)}}, \quad (48)$$

jossa μ on vahvennuskerroin (syöttöhäviön komplementti)
 f_s on rakenteen alin ominaistajuus.

Tuotevalmistajien tiedoista selviää, millä rakenteen dimensioilla ja materiaalivalinnoilla vaaditun ominaistajuuden alle päästään. Käytettävä jousivakio on dynaaminen kimmomoduuli. Ominaisajuuuden approksimaatio saadaan yhden vapausasteen mallin kaavalla

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{dyn}}{m_{tot}}}, \quad (49)$$

jossa k_{dyn} on dynaaminen jousivakio (tai dynaaminen kimmomoduuli)
 m_{tot} on värähtelevän rakenteen kokonaismassa.

Lisäksi vaimennusmateriaalin staattiselle painumalle on asetettu yläraja. Yleensä staattisen painuman pitää olla vähintään 50 % staattisen painuman rajasta, että vaimennus olisi tehokasta. Myös ratarakenteen dynaamiselle painumalle voi olla asetettu yläraja, joka voi rajoittaa käytettävissä olevia vaihtoehtoja.

Kun todellinen rakenne on valittu, voidaan sen ominaistaajuus ja siihen liittyvä vaimennuskyky laskea kappaleessa 12 esitettyjen periaatteiden mukaisesti. Alustavan mitoituksen tuloksena syntyy joukko vaimennusrakennerratkaisuja, jotka täyttävät vaimennusvaatimuksen. Koska tässä vaiheessa on käytössä enemmän lähtötietoja ja ne ovat luotettavampia, on myös mahdollista, että osassa värinähaitta-alueiksi epäillyistä alueista todetaan haitan pysyvän sallituissa raja-arvoissa ilman mitään värinänvaimennukseen liittyviä toimenpiteitä.

17.5 Rakennesuunnittelu

Vaimennusrakenteen rakennesuunnittelun lähtökohtana toimivat vaimennustarpeen täyttävät rakennerratkaisut. Tehtävänä on valita optimaalinen rakennerratkaisu ja sille optimaalinen käyttöalue. Työkaluina ratkaisun hakemiselle voidaan käyttää elinkaarianalyysia, vaatimuksia rakenteen toiminnalle poikkeustilanteissa (palotilanne, vedellä kyllästyminen, kontakti kemikaaleihin jne.), kustannusanalyysia ja/tai aikatauluvaikutuksia. Joskus on taroituksenmukaista myös mallintaa vaimennusrakenne tarkemmin, esimerkiksi kappaleessa 12 esitettyjä osamalleja hyödyntäen. Tämä voi tulla kyseeseen, kun vaimennusta tehdään tiettyjen kohteiden häiriötason alentamiseksi tai halutaan tutkia rakenteen toimintaa, kun rakenne on virunut.

Koska yhtä aikaa optimoitavia asioita on useita, suosittelen, että optimoinnissa hyödynnetään stokastista analyysia (esim. Monte Carlo), jos tutkittavien suureiden jakaumat ovat järkevällä tarkkuudella tiedossa. Monte Carlo –analyysin tuloksena voidaan vastata kysymykseen miten valittu vaimennusratkaisu toimii, kun heräte vaihtelee, lämpötila muuttuu tai ympäröivän kallion ominaisuudet vaihtelevat. Erikseen pitää analysoida vaimennusmateriaalin elinkaari eli huoltoväli sekä valinnan aikataulu- ja kustannusvaikutukset. Kannattaa huomioida myös valinnan välilliset vaikutukset, kuten esimerkiksi ratapalkkien alusmaton valintaan liittyen ratapenkereen kasvava huoltoväli sekä nopeutuva asennusaikataulu.

Vaimennusrakenteen suunnittelu on haastava tehtävä ja se vaatii pohjakseen paljon lähtötietoja. Mikäli tietoja ei ole käytettävissä riittävässä määrin, ei valittu ratkaisu välttämättä ole optimaalinen. Useimmissa tapauksissa riittää, että ratkaisu on hyvä, mutta tällöin jää aina riski, että jokin rakenteen toimintaan vaikuttava seikka on puuttunut lähtötiedoista ja rakenne ei toimi suunnitellulla tavalla ja valitulla luottamustasolla. Käytännössä tämä voi edellyttää varmuuskertoimen kasvattamista, mikä puolestaan syö ratkaisun taloudellisuutta.

18 YHTEENVETO

Tärinän etenemiselle kallio- ja maaperässä esitetään Golitsinin kaavan yleistetty muoto ja siihen liittyvät geometriset kertoimet, työn aikana kehitelty yksidimensionaalinen etenemismalli sekä aksisymmetrinen malli. Lisäksi aksisymmetristä mallia koskevia periaatteita voi soveltaa myös 3D-solidimallin rakentamiseen. Yleisimpien kivilajien ja maalajien mekaaniset ominaisuudet on esitetty työn alkupuolella. Myös eri materiaalien tyypilliset vaimennussuhteet on taulukoitu työssä. Tämä mahdollistaa alustavien haitta-arvioiden laske-
misen vaikka tutkittavasta kohteesta ei olisi vielä suoritettu perusteellisia tutkimuksia.

Kappaleessa 9 on selvitetty mitoituskäytäntö. Mitoituskäytäntöä tutkittiin kirjallisuusselvityksellä ratoliikenteen aiheuttaman tärinän ja runkomelun osalta erikseen. Kirjallisuusselvitys vaikutti keskeisenä tekijänä työssä annettuihin suosituksiin. Kirjallisuusselvitys käsitti pohjoismaat, Hollannin, Saksan, Sveitsin sekä Yhdysvallat.

Mallintamisperiaatteet on esitetty kappaleessa 10. Kappaleessa esitetään myös täysempiiriisiä kaavoja runkomelun ennustamiselle. Yksiaksiaalisen etenemismallin periaatteet ja perusteet esitellään. Aksisymmetrisen mallin osalta ilmoitetaan käytetyt lähtötiedot, geometria ja mallintamisoletukset. Ominaistaajuuksien kaavat esitetään lattiarakenteille ja maakerroksille.

Kappaleissa 11 ja 12 on käyty läpi suunnitteluun tarvittavat lähtötiedot ja kuinka ratarakenteen tärinänvaimennus voidaan suunnitella. Nämä tiedot määrittävät suunnittelutehtävään tarvittavat lähtötiedot ja ohjeistavat suunnittelutehtävän suorittamisessa. Kappaleen 12 lopussa on myös esitetty periaatteelliset rakennekuvat kolmesta yleisimmästä vaimennusrakennetekniikasta ja analysoitu niihin liittyviä vahvuuksia ja heikkouksia.

Kenttämittausten tutkimusoletukset, suorittaminen sekä tutkimustulokset on esitetty kappaleissa 13 ja 14. Tutkimuksia suoritettiin useassa kohteessa, mutta työn keskeiset tulokset perustuvat Kampin metroaseman itäpuolella suoritettuihin tärinä- ja äänenpainemittauksiin. Tulokset vahvistavat, että laajennettua Golitsinin kaavaa, yksidimensionaalista mallia sekä aksisymmetristä mallia voidaan käyttää odotettavissa olevien tärinätasojen ennustamiseen, kun takaisinlaskettu heräte tunnetaan. Aksisymmetrisen mallin osalta riittää ajoneuvon ak-

selipainon, geometrian ja ajonopeus. Metrojunan aiheuttama pystysuuntainen heräte, sen taajuussisältö sekä esiintymisjakauma on esitetty työn tuloksina.

Lopuksi on esitetty luotettavuusanalyysi koskien mittaustuloksia, numeerista laskentaa ja tilastollinen analyysi varmuuskertoimien määrittämiseksi. Työn tuloksista on tehty johtopäätöksiä, jotka on kerätty yhteen ja esitetty ennen kappaletta 17, jossa annetaan aineistoon perustuvat suositukset raja-arvoista, tärinänvaimennustarpeen arvioinnista sekä vaimennusrakenteen mitoittamisesta.

LÄHDELUETTELO

ABAQUS, 2006a, ABAQUS Theory Manual (v6.6), ABAQUS Online Documentation: Version 6.6-1

ABAQUS, 2006b, Getting Started with ABAQUS/Explicit: Keywords Version, ABAQUS Online Documentation: Version 6.6-1

Backholm, M. 1999, Metroradan runkoäänieristyksen tarkistusmittaukset Itäkeskus – Vuosaari 16.12.1998 – 28.9.1999, TR 1827-2, 4 + 8 s.

Backholm, M. 2006, Tikkurilan ydinkeskustan runkomeluselvytys, TR 2128-1, 4 + 5 s.

Bahrekazemi, M. 2004, Train-Induced Ground Vibration and Its Prediction, Stockholm, 183 s. TRITA-JOB PHD 1005, ISSN 1650-9501

Banverket, 2006, Buller och Vibrationer från spårburen linjetrafik – Riktlinjer och tillämpning, Dnr. S02-4235/SA60, Stockholm, 97 s.

Beranek, L. 1971, Noise and Vibration Control, New York, 650 s. ISBN 07-004841-X

Christensen, N. I. & Mooney, W. D. 1995, Seismic Velocity Structure and Composition of the Continental Crust: A Global View, Journal of Geophysical research, Vol. 100, No B7, pp. 9761-9788.

Cremer, L. & Heckl, M. 1988, Structure-Borne Sound, Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies, Berlin, 573 s. ISBN 0-387-18241-1

DEFRA 2003, A Review of Published Research on Low Frequency Noise and its Effects, EPG 1/2/50, Surrey, 88 s.

DEFRA 2005, Proposed criteria for the assessment of low frequency noise disturbance, DEFRA NANR45, Salford, 113 s.

DIN 4150-2, 1999, Structural Vibration, Part 2: Human exposure to vibration in buildings, DIN, Berlin, 23 s.

DIN 45669-1, 1995, Measurement of vibration immission - Part 1: Vibration meters; requirements, verification, 19 s.

Eloranta, P. 2006, Laboratory Testing of Gneissic Rocks in Olkiluoto Borehole OI-KR24, Posiva, Working Report 2006-80, 97 s.

EN 1990, 2002, Eurokoodi - Rakenteiden perusteet, CEN, 138 s.

FRA 2005, High-Speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assessment, Burlington, HMMH 293630-4, 235 s.

FTA 2006, Transit Noise and Vibration Impact Assessment, Vienna, FTA-VA-90-1003-06, 274 s.

Geoff, L. et al. 2003, A Review of Published Research on Low Frequency Noise and its Effects, 87 s.

Gercek, H. 2006, Poisson's ratio for rocks, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 44 (2007) 1 – 13

Golitsin, B. B. 1912 On dispersion and attenuation of seismic surface waves, Russian Academy of Science News, Vol. 6. No. 2

Gyproc, 1992, Gyproc äänikirja, Rakennusakustiikka, keskeisiä ohjeita, Helsinki, 135 s. ISBN 952-90-3966-2

Hall, L. 2000, Simulations and Analyses of Train Induced Ground Vibrations – A Comparative Study of Two and Three Dimensional Calculations with Actual Measurements, Stockholm, 196 s. TRITA-AMI PHD 1034, ISSN 1400-1284, ISRN KTH/AMI/PHD--034--SE

Harvey F. & Munson W. A. 1933, Loudness, its definition, measurement and calculation, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 5, 82 – 108

Hanski, M. 2004, Raidemelun vaimentaminen kiskoon kiinnitettävien vaimennuselementein, diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Espoo, 119 s.

Hatheway, A. W. & Kiersch, G. A. 1986, Engineering properties of rocks, In: Carmichael R.S. editor. Handbook of physical properties of rocks, vol. 2, Boca Raton, F. L. CRC Press, p. 289 – 331

Head, J. M. & Jardine, F. M. 1992, Ground-borne vibrations arising from piling, Construction Industry Research and Information Association, CIRIA Technical note 142, London

HKL, 1999, Metronsuunnittelun käsikirja, Helsinki, 111 s.

Huhtala, T. T. 2006, Mittausjakson pituuden vaikutus maaperästä mitatun raideliikenteen värähtelyn asuntoihin aiheuttaman haitan arvioinnissa, diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Espoo, 105 + 29 s.

Huhtala, T. T. 2007a, Martinlaakson kaupunginosan korttelin 17544 värähtelymittaus, Lausunto 3383-4, Helsinki, 8 + 1 s.

Huhtala, T. T. 2007b, Martinlaakson kaupunginosan korttelin 17544 värähtelyselvityksen täydennys, lausunto 3383-6, Helsinki, 3 + 1 s.

IEC 61672-1, 2002, Electroacoustics - Sound Level Meters - Part 1: Specifications, 85 s.

ISO 8041:2005, Human response to vibration. Measuring instrumentation, ISO, 91 s.

ISO 10137, 2007, Bases for Design of Structures – Serviceability of Buildings and Walkways Against Vibrations, ISO, 44 s.

ISO 16063-21:2003, Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer, ISO, 29 s.

Kaaresoja, K. 2007, Raideliikennetärinä – paikkatietojärjestelmän kehittäminen ja tärinäkohteiden kartoitus Suomessa, insinööritö, Stadia, Helsinki, 55 s.

Kauranne, L. K. 1968, Kallioperän tutkiminen. Maa- ja vesirakennus, RIL 98, Vammala

Klæboe et al. 2003, Vibration in Dwellings from Road and Rail Traffic – Part II: Exposure – Effect Relationships Based on Ordinal Logit and Logistic Regression Models, Applied Acoustics vol. 64, 89 – 109, ISSN 0003-682X

Klein, G. & Rainer, J. H. 1995, Wave Propagation teoksessa *Vibration Problems in Structures – Practical Guidelines*, Berlin, 234 s. ISBN 3-7643-5148-9

Kukkonen, I. T. & Kinnunen, K. A. & Peltonen, P. 2003, Mantle xenoliths and thick lithosphere in the Fennoscandian Shield. *Physics and Chemistry of Earth*, 28 (2003), p. 349 - 360.

Kuppelwieser H. & Ziegler A. 1996, A Tool for Predicting Vibration and Structure-Borne Noise Immissions Caused by Railways, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 193, 261 – 267, ISSN 0022-460X

Kuusisto, M. 2007, Suomen maankuoren kivilajikoostumuksen tulkinta seismisistä aineistoista, *Lisensiaatintyö*, Helsingin yliopisto, Helsinki, 109 s.

Leppänen, H. 2008, Paalutuksesta ja pontituksesta aiheutuva tärinä, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 160 + 28 s.

Leppänen, J. 2006, Selvitys liikenteen aiheuttamasta tärinästä ja tärinähaitan korvaamisesta, *Tiehallinto*, sisäinen julkaisu 31/2006, Helsinki, 31 s. ISSN 1457-991X, TIEH 4000527

Lombaert G., Degrande G., Bekaert J. 2008, The Influence of Train Speed on Vibrations Due to High Speed Trains teoksessa *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*, Munich, 462 s. ISBN 978-3-540-74892-2

Lysmer, J. 1978, Analytical procedures in soil dynamics, *Proceedings, ASCE Geotechnical Engineering Division Specialty Conference*, Pasadena, CA, Vol. 3, 1267 – 1317

Mahrenholtz, O. & Bachmann, H. 1995, Appendix C Damping teoksessa *Vibration Problems in Structures – Practical Guidelines*, Berlin, 234 s. ISBN 3-7643-5148-9

Majapuro, J. 2006, Geophysical Borehole logging of the Boreholes KR37, KR37B and KR38 at Olkiluoto, Posiva, Working Report 2006-30, 81 s.

Melke, J. 1985, Noise and vibration from underground railway lines – proposals for a prediction procedure, *Fourth International Workshop on Railway and Tracked Transit System Noise*, Netherlands

METU. 1989a, Investigation on the determination of rock mechanics and design parameters for coal and coal measure rocks at Asma Mine. Report prepared for TTK, Department of Mining Engineering, Ankara

METU. 1989b, Investigation on the determination of rock mechanics and design parameters for coal and coal measure rocks at Gelik Mine. Report prepared for TTK, Department of Mining Engineering, Ankara

METU. 1989c, Investigation on the determination of rock mechanics and design parameters for coal and coal measure rocks at Kandilli Mine. Report prepared for TTK, Department of Mining Engineering, Ankara

Miljøstyrelsen, 1997, Lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer I eksternt miljø, Orientering fra Miljøstyrelsen, Nr. 9 1997, København, s. 51. ISBN 87-7810-830-6

Miller, G. F. & Pursey, H. 1954, On the Partition of Energy Between Elastic Waves in a Semi-Infinite Solid, Proceedings of the Royal Society, London, Series A, Vol. 233, 55 – 69, ISSN 0080-4630

Mononen, Sakari. 2003, Kallioperän rakennettavuus – Jännitystilan mallinnus. TEKES-projektin loppuraportti. Espoo, Teknillinen korkeakoulu, kalliotekniikan laboratorio, TKK-KAL-A-32, 30 s. ISBN 951-22-6874-4, ISSN 1239-6788

Nakra, B. C. 1998, Vibration Control in Machines and Structures Using Viscoelastic Damping, Journal of Sound and Vibration Vol. 211, 449 – 465, ISSN 0022-460X

Nielsen, J. C. O. 1999, Acoustic Optimization of Railway Sleepers, Journal of Sound and Vibration Vol. 231, 753 – 764, ISSN 0022-460X

Niini, H. & Hakkarainen, V. & Patrikainen, P. 1982, Korkea-aktiivisen ydinjätteen loppusijoituksen geologiset tekijät. Raportti YTJ-82-36, Voimayhtiöiden ydinjätetoimikunta, 189 s.

NS 8176, 2005, Vibration and shock - Measurement of vibration in buildings from land based transport and guidance to evaluation of effects on human beings, Oslo, 27 s.

Pajunen, M., Airo, M.-L., Elminen, T., Niemelä, R., Salmelainen, J., Vaarma, M., Wasenius, P. ja Wenneström, M., 2002. Raportti I. Menetelmänkehitys ja ohjeistus. ”Kallioperän rakennettavuusmalli taajamiin” -projekti. GTK, raportti K.21.42/2002/5. 95 s.

Patrikainen, P. (1976 – 1982), Tutkimustuloksia lisensointityöstä (kesken vuonna 1983)

Patrikainen, P. 1983, Suomen kivilajien merkittävimmät materiaaliominaisuudet ydinjätteen loppusijoituksen kannalta, Espoo, Tiedonanto 25 G – 1.5, 25 s.

Peltonen, T., Backholm M., Lahti T. 2005, Raideliikenteen melu- ja värinätkimuksia, artikkeli, Akustiikkapäivät 26. – 27.9.2005, Helsinki, 6 s.

Peltoniemi, M. 1988, Maa- ja kallioperän geofysikaaliset tutkimusmenetelmät. Otakustantamo 515, Otaniemi, 411 s.

Pretlove, A. J. & Natke, 1995, H. G. Basic vibration theory and its application to beams and plates teoksessa Vibration Problems in Structures – Practical Guidelines, Berlin, 234 s. ISBN 3-7643-5148-9

Reicke, L. & Popp, K. 2005, Identification of Running-State of Railway Wheelsets, Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics 5, 513 – 514 (2005)

RHK A 6/2007, Suomen rataverkon värinäselvitys – Kirjallisuuskatsaus ja värinäkohteet vuosina 2005 – 2006, Ratahallintokeskus, Helsinki, 59 s. ISBN 978-952-445-191-3

Riekkola, R. 1976, Maa- ja kalliorakennus, RIL 98, Helsinki, 520 s. ISBN 951-758-007-X

RIL 121-2004, Pohjarakennusohjeet, Helsinki, 137 s. ISBN 951-758-439-3

RIL 243-1-2007, Rakennusten akustinen suunnittelu – akustiikan perusteet, Helsinki, 224 s. ISBN 978-951-758-477-7

RockLab 1.0, 2002, Rock mass strength analysis using the Hoek-Brown failure criterion, Roscience, Toronto, ilmainen tietokoneohjelma

Roësset, J. M. 1977, Soil amplification of earthquakes, kappale 19 teoksessa Desai, C. S. & Christian, J. T. Numerical models in Geotechnical Engineering, pp. 871 – 880, McGraw-Hill, New York, NY, US.

SBB 1992, Generaldirektion Umweltbilanz Huckepack-Korridor Gotthard, Konfliktanalyse Körperschall und Erschütterungen, Bern, Switzerland

SBR 2006, Trillingen: meet- en beroordelingsrichtlijnen – hinder voor personen in gebouwen, Verrebroek, 36 s. ISBN 978-90-5367-429-1

SFS-EN 1990, Eurocode. Rakenteiden perusteet, SFS, Helsinki, 138 s.

Socialstyrelsen, 2005, The National Board of Health and Welfare's general advice SOSFS on indoor noise 2005:6, Stockholm

Soveri, U. & Kauranne, L. K. 1975, Rakennusgeologia I – Suomen rakennusgeologia, Ota-kustantamo 272, Otaniemi, 194 s. ISBN 951-671-029-8

STM 2003:1, Asumisterveysohje – Asuntojen ja muiden oleskelutilojen fysikaaliset, kemialliset ja mikrobiologiset tekijät, Sosiaali- ja terveysministeriö, Helsinki, 93 s. ISBN 952-00-1301-6

STUVA 1981 Forschungsbericht Heft 14. Schwingungsmessungen in der Umgebung innerstädtischer Bahn- und Strassentunnels. Köln: Herausgeber Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V.

SN 640 312a, 1992, Erschütterungen – Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke, Schweizer Norm, Zurich, 10 s.

Syrjänen, P. 1997, Kaivoslouhosten ja kalliotilojen suunnittelun kalliomekaaniset lähtötiedot. Kalliomekaniikan päivä 12.11.1997, hotelli Kuninkaantie, Espoo. Rakennusgeologinen yhdistys ry:n julkaisu, vol. 23. Tampere. ss. 21 – 36.

Talja, A. et al., 2008, Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi, Espoo, 95 + 69 s. VTT Tiedotteita 2425, ISBN 978-951-38-7197-0

Talja, A. 2004, Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta, Espoo, 50 + 15 s. VTT Tiedotteita 2278, ISBN 951-38-6523-1

Talja, A. 2003, Liikenneperäinen tärinä – Kirjallisuusselvitys raja-arvoista ja tärinän mittaamisesta, VTT:n sisäinen raportti RTE50-IR-5/2003, Julkaisematon.

Talja, A. & Toratti, T. & Järvinen, E. 2002, Lattioiden värähtelyt – Suunnittelu ja kokeellinen arviointi, Espoo, 50 + 12 s. VTT Tiedotteita 2124, ISBN 951-38-5937-1

Tanttari, J. & Saarinen, K., 1995, Työkoneiden melun vähentäminen – perusteet, Tampere, 124 s. ISBN 951-817-619-1

Thomson, W. T. 1993, Theory of Vibration with Applications, T. J. International Ltd. Padwstow, 546 s. ISBN 0-7487-4380-4

Timoshenko, S. 1937, Vibration Problems in Engineering, D. Van Nostrand Company Inc. Stanford, 470 s.

Tukeva, P. 2008. Pohva II – Langaton reaaliaikainen paalutustärinän mittausta, Rakentamisen aiheuttamat tärinät –workshop, 2.6.2008, Espoo, 9 s.

Turunen-Rise I.H. et al. 2002, Vibration in dwellings from road and rail traffic – Part I: a new Norwegian measurement standard and classification system, Applied Acoustics Vol 64 (2003) 71 – 87, ISSN 0003-682X

Törnqvist, J. & Talja, A. 2006, Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa, Espoo, 46 + 33 s. VTT Working Papers 50, ISBN 951-38-6602-5

Uotinen, L. 2008, Äänenpainekartoitus 24.7.2008: Kalliotunnelien ratarakenteiden tärinävaimennuksen mitoitus ja suunnittelu, Kalliosuunnittelu Oy, 3 + 6 s. Julkaisematon.

Vadillo et al. 1996, Subjective Reaction to Structurally Radiated Sound from Underground Railways: Field Results, Journal of Sound and Vibration Vol. 193, 65 – 74, ISSN 0022-460X

- Visti, M. 1973, Kivilajien porattavuudesta laboratorio-olosuhteissa. VTT, Geotekniikan laboratorio, Tiedonanto no. 6, Espoo
- Vuolio, R. 1985, Räjätys- ja louhintatöiden suunnittelu ja suorittaminen, Forssa, 256 s. ISBN 951-99623-7-9
- Vutukuri, V. S. & Lama R. D. & Saluja S. S. 1974, Handbook of mechanical properties of rock, vol. 1. Clausthal: Trans Tech Publications
- Wood Focus, 2004, Ääneneristys puutalossa, Puurakenteisen asuinrakennuksen ääneneristävyyden suunnitteluohje, 110 s.
- Wu, T.X. 2007, On the Railway Track Dynamics with Rail Vibration Absorber for Noise Reduction, Journal of Sound and Vibration Vol. 309, 739 – 755, ISSN 0022-460X
- Zaleskii, B. V. 1967, Physical and mechanical properties of rocks – Jerusalem
- Zheng, D. Y. et al. 2000, Vibration of Vehicle on Compressed Rail on Viscoelastic Foundation, Journal of Engineering Mechanics Vol. 126, No. 11, 1141 – 1147, ISSN 0733-9399
- Ziegler, A. VIBRA-1-2-3: A Software Package for Ground Borne Vibration and Noise Prediction

LIITTEET

- A Yleisimmät taajuuskaistat
- B1 Taajuuspainotukset
- B2 Taajuuspainotukset-kuvaaja
- C Geometrinen vaimennus
- D Abaqus-mallin solmunumerointi
- E Kaavakokoelma
- F Vaimenemisen mittaustulokset (Kamppi)
- G Yksiulotteisen mallin johto ja perusteet
- H 1D-tärinän eteneminen muunnospisteeseen

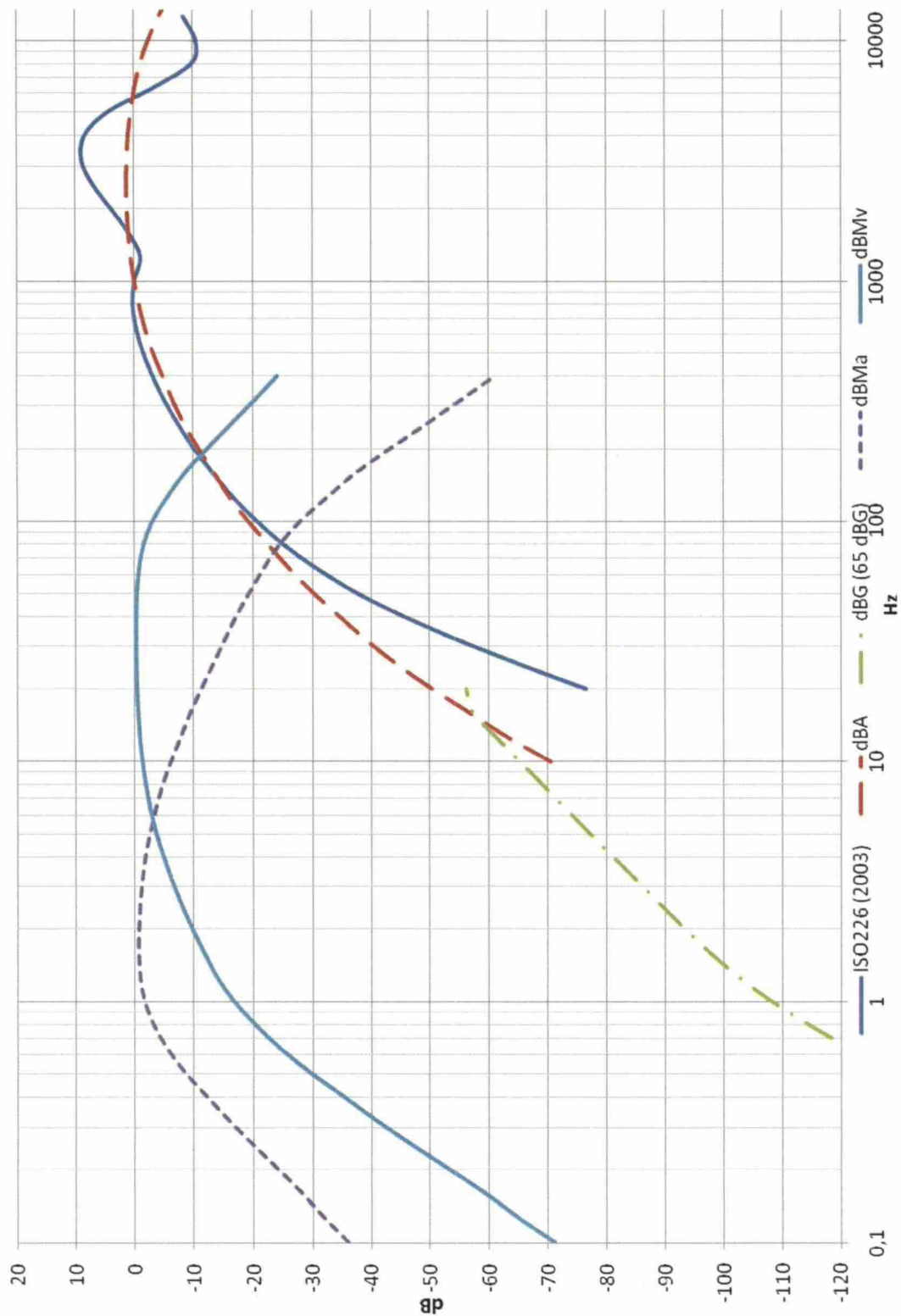
LIITE A – Yleisimmät taajuuskaistat

n	Todellinen taajuus [Hz]	Terssikaista [Hz]	Oktaavikaista [Hz]
-10	0,100	0,1	
-9	0,126	0,125	0,125
-8	0,158	0,16	
-7	0,200	0,2	
-6	0,251	0,25	0,25
-5	0,316	0,315	
-4	0,398	0,4	
-3	0,501	0,5	0,5
-2	0,631	0,63	
-1	0,794	0,8	
0	1,000	1	1
1	1,259	1,25	
2	1,585	1,6	
3	1,995	2	2
4	2,512	2,5	
5	3,162	3,15	
6	3,981	4	4
7	5,012	5	
8	6,310	6,3	
9	7,943	8	8
10	10,000	10	
11	12,589	12,5	
12	15,849	16	16
13	19,953	20	
14	25,119	25	
15	31,623	31,5	31,5
16	39,811	40	
17	50,119	50	
18	63,096	63	63
19	79,433	80	
20	100,000	100	
21	125,893	125	125
22	158,489	160	
23	199,526	200	
24	251,189	250	250
25	316,228	315	
26	398,107	400	
27	501,187	500	500
28	630,957	625	
29	794,328	800	
30	1000,000	1000	1000

LIITE B1 – Taajuuspainotukset

Terssi- kaista	ISO 226	A-painotus	G- painotus (65 dB)	M- painotus (W _m) a	M- painotus (W _m) v
[Hz]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
0,1			-185,0	-36,0	-71,10
0,125			-177,2	-32,0	-65,10
0,16			-168,7	-28,0	-59,10
0,2			-160,9	-24,0	-53,12
0,25			-153,2	-20,0	-47,14
0,315			-145,2	-16,1	-41,21
0,4			-136,9	-12,3	-35,38
0,5			-129,3	-8,7	-29,77
0,63			-121,7	-5,5	-24,60
0,8			-114,2	-3,1	-20,19
1			-108,0	-1,6	-16,68
1,25			-102,6	-0,9	-13,94
1,6			-97,4	-0,6	-11,68
2			-93,2	-0,6	-9,71
2,5			-89,2	-0,8	-7,91
3,15			-85,1	-1,2	-6,28
4			-80,9	-1,7	-4,83
5			-77,1	-2,5	-3,59
6,3			-73,0	-3,5	-2,58
8			-68,9	-4,7	-1,80
10		-70,4	-65,0	-6,1	-1,22
12,5		-63,4	-61,1	-7,7	-0,81
16		-56,7	-57,1	-9,4	-0,53
20	76,6	-50,5	-56,0	-11,3	-0,35
25	65,6	-44,7	...	-13,1	-0,23
31,5	55,1	-39,4		-15,1	-0,18
40	45,5	-34,6		-17,1	-0,20
50	37,6	-30,2		-19,2	-0,32
63	30,9	-26,2		-21,6	-0,67
80	25,0	-22,5		-24,4	-1,48
100	20,5	-19,1		-27,9	-3,02
125	16,6	-16,1		-32,4	-5,46
160	13,1	-13,4		-37,5	-8,64
200	10,1	-10,9		-43,2	-12,27
250	7,6	-8,6		-49,0	-16,11
315	5,1	-6,6		-55,0	-20,04
400	3,1	-4,8		-60,9	-24,02
500	1,5	-3,2	
625	0,3	-1,9			
800	-0,3	-0,8			
1000	0,0	0,0			

LIITE B2 – Taajuuspainotukset-kuvaaja



LIITE C – Geometrinen vaimennus

Aaltoliikkeen amplitudin, nopeuden ja kiihtyvyyden kaavat ovat

$$x = u \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (C.1)$$

$$v = \dot{x} = u \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \omega, \quad (C.2)$$

$$a = \ddot{x} = -u \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \omega^2, \quad (C.3)$$

jossa u on aaltoliikkeen amplitudi
 ω on kulmanopeus, $\omega = 2\pi f$
 f on taajuus.

Aaltoliikkeen energian yhtälö²⁹ on

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2}mv^2 + mgx, \quad (C.4)$$

jossa m on partikkelin massa
 g on putoamiskiihtyvyys, $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$.

Partikkelin nopeus on huipussaan, kun amplitudi on nolla. Tällöin energian lauseke on

$$E = E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (C.5)$$

ja vastaava energiatiheys

$$E_{\text{dens}} = \frac{1}{2} \frac{m}{V} v^2 = \frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{1}{2} \rho \omega^2 u^2. \quad (C.6)$$

Etenevän aaltoliikkeen energia jakaantuu rintamalle, joka voi olla joko viivamainen tai pinta. Energian säilyvyyslain mukaan kahden rintaman energioiden tulee olla yhtä suuret. Näin kahden eri etäisyydelle ehtineen aaltoliikkeen energioiden suhteeksi saadaan

$$E_{\text{dens},1} A_1 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 A_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 A_2 = E_{\text{dens},2} A_2, \quad (C.7)$$

jossa A_i on rintaman pituus tai pinta-ala
 v_i on partikkelin nopeus.

Homogeenisessä väliaineessa, saadaan nopeuksien ja amplitudien suhteeksi

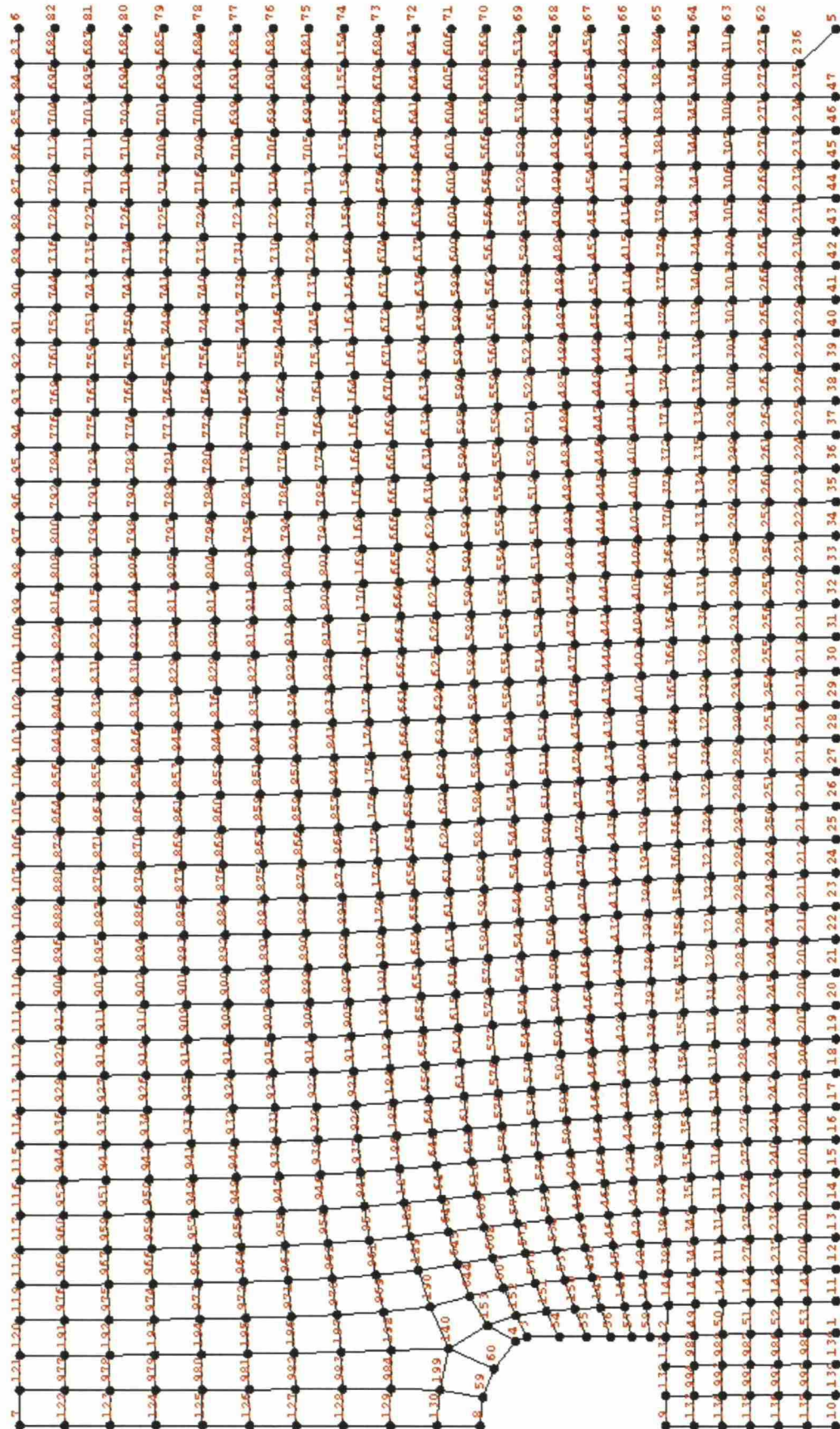
$$\frac{v_1^2}{v_2^2} = \frac{A_2}{A_1} \Leftrightarrow \frac{u_1^2}{u_2^2} = \frac{A_2}{A_1}, \quad (C.8)$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \Leftrightarrow \frac{u_1}{u_2} = \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \quad (C.9)$$

eli geometrisen suhteen neliöjuuri \square .

²⁹ Materiaalivaimennusta ja muita energiahäviöitä ei ole huomioitu

LIITE D – Abaqus-mallin solmunumerointi



LIITE E – Kaavakokoelma

Oheiseen kaavakokoelmaan on kerätty värähtely- ja vaimennustehtävissä usein tarvittavia kaavoja. Esiintyvien symbolien merkitys on selitetty työn sivulla kuusi (Symboliluettelo).

Harmonisen aaltoliikkeen amplitudi

$$x = u \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (\text{E.1})$$

Harmonisen aaltoliikkeen nopeus

$$v = \dot{x} = u \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \omega \quad (\text{E.2})$$

Harmonisen aaltoliikkeen kiihtyvyys

$$a = \ddot{x} = -u \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \omega^2 \quad (\text{E.3})$$

Ominaiskulmanopeus

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{E.4})$$

Ominaistaajuus

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (\text{E.5})$$

Vaimennussuhde

$$\xi = \frac{c}{2m\omega} \quad (\text{E.6})$$

Vaimennusvakio

$$\gamma = \frac{2\pi\xi}{\lambda} \quad (\text{E.7})$$

Q-tekijä (vahvennuskerroin resonanssissa)

$$Q = \frac{1}{2\xi} \quad (\text{E.8})$$

Tärinän etenemisyhtälö (Golitsin)

$$u_2 = u_1 \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} e^{-\gamma(r_2 - r_1)} \quad (\text{E.9})$$

P-aallon nopeus

$$v_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (\text{E.10})$$

S-aallon nopeus

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (\text{E.11})$$

Rayleigh-aallon nopeus

$$v_R = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)} \frac{0,87 + 1,12\nu}{1+\nu}} \quad (\text{E.12})$$

Approksimaatio äänen nopeudelle ilmassa

$$v_a = 20,05 \sqrt{\frac{T + 273,2\text{C}^\circ}{1\text{C}^\circ}} \frac{m}{s} \quad (\text{E.13})$$

Vaaditun ominaistaajuuden ylärajan approksimaatio

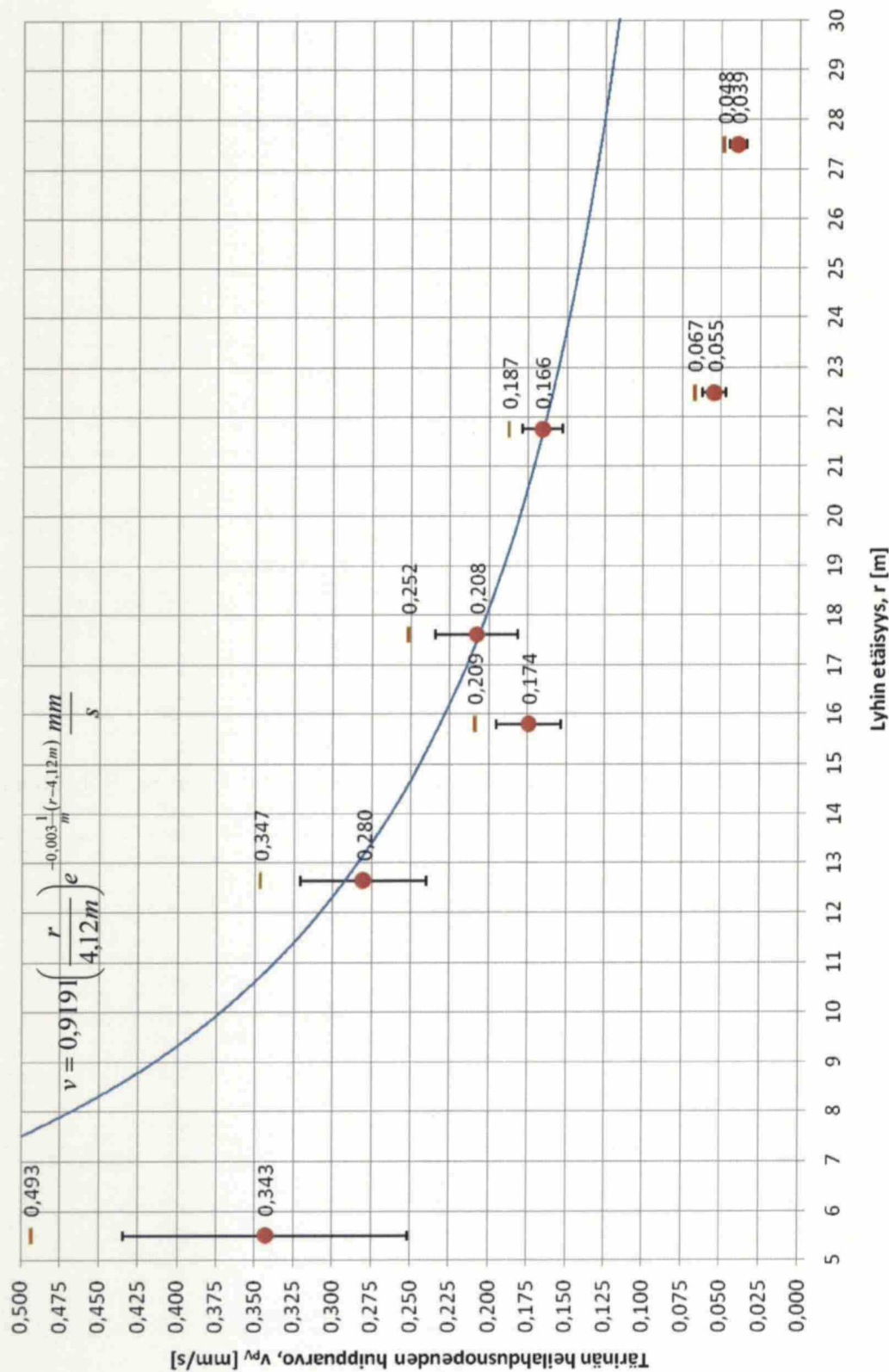
$$f_{n,\max} = \frac{f_s}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{\mu}\right)}} \quad (\text{E.14})$$

Tärinänvaimennusrakenteen ominaistaajuuden approksimaatio

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{dyn}}{m_{tot}}} \quad (\text{E.15})$$

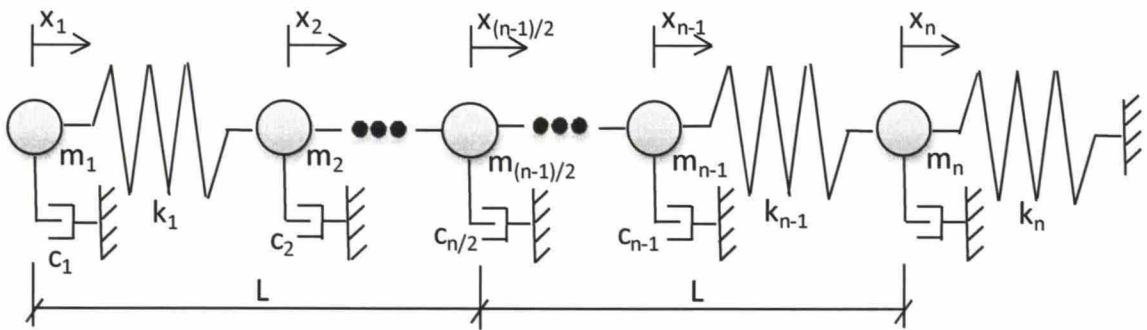
(Pretlove & Natke 1995; Klein & Rainer 1995; Hall 2000; Beranek 1971; Thomson 1993)

LIITE F – Vaimenemisen mittaustulokset (Kamppi)

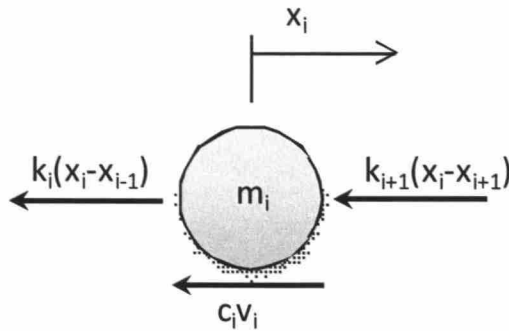


LIITE G – Yksiulotteisen mallin johto ja perusteet

Tässä liitteessä johdetaan yksiakselisen mallin värähtelyä kuvaavat matriisiyhtälöt sekä formuloidaan energiaekvivalentit massa- ja jäykkyyismatriisit sekä esitetään perusteet mallin käyttämiselle. Käytetty malli on vapaa vaimennettu värähtely (jolloin malliin ei vaikuta ulkoista voimaa, vaan heräte annetaan alkusiirtymänä ja/tai alkunopeutena). Matriisinotatona käytetään alaviivaa. Mallin havainnekuva on esitetty kuvana G.1 ja yksittäisen diskeroidun massan vapaakappalekuva kuvana G.2.



Kuva G.1. Yksiakselisen mallin havainnekuva



Kuva G.2 Diskeroidun massan i vapaakappalekuva

Kuvasta nähdään, että resultoiva voima on

$$F_i = -k_i(x_i - x_{i-1}) - k_{i+1}(x_i - x_{i+1}) - c_i v_i. \quad (G.1)$$

Toisaalta tiedetään³⁰, että

$$F_i = m_i a_i = m_i \ddot{x}_i. \quad (G.2)$$

³⁰ Isaac Newton (1642 – 1727) teoksessa Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (1687)

Saadaan tasapainoyhtälö

$$k_i(x_i - x_{i-1}) - k_{i+1}(x_i - x_{i+1}) - c_i \dot{x}_i = m_i \ddot{x}_i, \quad (\text{G.3})$$

joka voidaan esittää muodossa

$$m_i \ddot{x}_i + c_i \dot{x}_i + k_i(x_i - x_{i-1}) + k_{i+1}(x_i - x_{i+1}) = 0, \quad (\text{G.4})$$

Indeksi i voidaan poistaa siirtymällä matriisinotaatioon

$$\underline{M} \ddot{\underline{x}} + \underline{C} \dot{\underline{x}} + \underline{K} \underline{x} = 0, \quad (\text{G.5})$$

jossa massamatriisi on

$$\underline{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & m_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & m_n \end{bmatrix}, \quad (\text{G.6})$$

vaimennusmatriisi on

$$\underline{C} = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & c_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & c_n \end{bmatrix} \quad (\text{G.7})$$

ja jäykkyysmatriisi on

$$\underline{K} = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2 & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & k_n + k_{n+1} & -k_{n+1} \\ 0 & 0 & \dots & -k_{n+1} & k_{n+1} + k_{n+2} \end{bmatrix}. \quad (\text{G.8})$$

Kun käytetään merkintöjä

$$\underline{\Omega}_n = \left(\underline{M}^{-1} \underline{K} \right)^{\frac{1}{2}} = \underline{X} \underline{\omega}_n \underline{X}^{-1}, \quad (\text{G.9})$$

$$2\underline{\Omega}_c = \alpha \underline{I} + \beta \underline{\Omega}_n^2, \quad (\text{G.10})$$

$$\underline{\Omega}_d = \sqrt{\underline{\Omega}_n^2 + \underline{\Omega}_c^2}, \quad (\text{G.11})$$

voidaan vapaan vaimennetun värähtelyn alkuarvottehtävä kirjoittaa standardimuodossa

$$\ddot{\underline{x}} + 2\underline{\Omega}_c \dot{\underline{x}} + \underline{\Omega}_n^2 \underline{x} = 0 \quad \wedge \quad \underline{\dot{x}} = \underline{\dot{x}}_0 \quad \wedge \quad \underline{x} = \underline{x}_0 \quad (\text{G.12})$$

ja kun käytetään apumuuttujaa \underline{x} , voidaan merkitä

$$\underline{x} = \underline{X} \underline{y} \quad (\text{G.13})$$

saadaan

$$\underline{X} \ddot{\underline{y}} + 2\underline{\Omega}_c \underline{X} \dot{\underline{y}} + \underline{\Omega}_n^2 \underline{X} \underline{y} = 0 \quad \wedge \quad \underline{X} \dot{\underline{y}} = \underline{X} \dot{\underline{y}}_0 \quad \wedge \quad \underline{X} \underline{y} = \underline{X} \underline{y}_0 \quad (\text{G.14})$$

ja kun tätä yhtälöä kerrotaan vasemmalla \underline{X} -matriisin käänteisvektorilla, saadaan

$$\ddot{\underline{y}} + 2\underline{\omega}_c \dot{\underline{y}} + \underline{\omega}_n^2 \underline{y} = 0 \quad \wedge \quad \dot{\underline{y}} = \dot{\underline{y}}_0 \quad \wedge \quad \underline{y} = \underline{y}_0, \quad (\text{G.15})$$

jossa merkinnät ovat vastaavasti

$$2\underline{\omega}_c = \alpha \underline{I} + \beta \underline{\omega}_n^2, \quad (\text{G.16})$$

$$\underline{\omega}_d = \sqrt{\underline{\omega}_n^2 - \underline{\omega}_c^2}. \quad (\text{G.17})$$

Kaikki apumuuttujien \underline{y} yksittäiset yhtälöt ovat ratkaistavissa toisistaan riippumattomasti.

Ratkaisun muoto yksittäiselle riville i on

$$\underline{y}_i = \exp(-\underline{\omega}_{ci} t) \left[\cos(\underline{\omega}_{di} t) \underline{y}_{0i} + \sin(\underline{\omega}_{di} t) \underline{\omega}_{di}^{-1} \left(\dot{\underline{y}}_{0i} + \underline{\omega}_{ci} \underline{y}_{0i} \right) \right] \quad (\text{G.18})$$

eli matriisimuodossa

$$\underline{y} = \exp(-\underline{\omega}_c t) \left[\cos(\underline{\omega}_d t) \underline{y}_0 + \sin(\underline{\omega}_d t) \underline{\omega}_d^{-1} \left(\dot{\underline{y}}_0 + \underline{\omega}_c \underline{y}_0 \right) \right]. \quad (\text{G.19})$$

Palautetaan nyt alkuperäinen muuttuja

$$\underline{y} = \underline{X}^{-1} \underline{x}. \quad (\text{G.20})$$

Näin saamme muodon

$$\underline{X}^{-1} \underline{x} = \exp(-\underline{\omega}_c t) \left[\cos(\underline{\omega}_d t) \underline{X}^{-1} \underline{x}_0 + \sin(\underline{\omega}_d t) \underline{\omega}_d^{-1} \left(\underline{X}^{-1} \dot{\underline{x}}_0 + \underline{\omega}_c \underline{X}^{-1} \underline{x}_0 \right) \right]. \quad (\text{G.21})$$

Kertomalla vasemmalta matriisilla \underline{X} saamme ratkaistua alkuperäisen kytketyn ongelman

$$\underline{x} = \underline{X} \exp(-\underline{\omega}_c t) \cos(\underline{\omega}_d t) \underline{X}^{-1} \underline{x}_0 + \underline{X} \exp(-\underline{\omega}_c t) \sin(\underline{\omega}_d t) \underline{\omega}_d^{-1} \left(\underline{X}^{-1} \dot{\underline{x}}_0 + \underline{\omega}_c \underline{X}^{-1} \underline{x}_0 \right). \quad (\text{G.22})$$

Kun tunnetaan diskretoitu massamatriisi (\underline{M}), vaimennusmatriisi (\underline{C}) sekä jäykkyyismatriisi (\underline{K}) voidaan yllä oleva yhtälö ratkaista. Edellä esitetty ratkaisu kuvaa värähtelyn etenemistä sauvassa. Diskretoidun sauvan elementtikohtainen jousivakio on muotoa

$$k_e = \frac{E_e A_e}{L_e}. \quad (\text{G.23})$$

Kun halutaan ottaa huomioon geometrinen vaimeneminen, täytyy jäykkyyttä kasvattaa sopivasti, että värähtely vaimenee oikein. Koska värähtelyn etenee rintamana, voidaan kineettisen maksimienergian kaavaksi saada

$$\max(E_k) = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m u^2 \omega^2. \quad (\text{G.24})$$

Energiaintensiiteetti määritellään

$$I_E = \frac{E_{tot}}{A}. \quad (\text{G.25})$$

Kun kineettinen energia on maksimissaan, ei värähtelevällä rintamalla ole potentiaalienergiaa. Kahden eri etäisyydellä olevan samanmuotoisen pinta-alan suhde on neliöllisesti riippuvainen etäisyydestä. Koska energian täytyy säilyä, pätee

$$E_1 A_1 = E_2 A_2, \quad (\text{G.26})$$

josta saadaan

$$E_2 = E_1 \frac{A_1}{A_2}, \quad (\text{G.27})$$

Sijoitetaan kineettisen energian maksimin lausekkeet ja hyödynnetään geometrinen suhde

$$\frac{1}{2} m_2 u_2^2 \omega_2^2 = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 \omega_1^2 \frac{r_1^2}{r_2^2}, \quad (\text{G.28})$$

Otaksutaan, että värähtelevä massa ja kulmanopeus eivät muutu, jolloin kaava saa muodon

$$u_2 = u_1 \frac{r_1}{r_2}. \quad (\text{G.29})$$

Pinta-alan kasvaminen on otettava huomioon jousten jäykkyydessä. Koska siirtymä on käänteisesti riippuvainen jousen jäykkyydestä, voidaan jousten jäykkyyttä kasvattaa kertoimella

$$k_{prev} = \frac{r + \left(i - \frac{1}{2}\right)p}{r} \quad (\text{G.30})$$

jossa r on referenssietäisyys
 p on elementin pituus.

tai kertoimella

$$k_{prev} = \frac{r + \left(i + \frac{1}{2}\right)p}{r} \quad (\text{G.31})$$

riippuen siitä onko kyseessä edeltävä vai seuraava jousi. Jos referenssipituus ja elementin pituus ovat samat, on resultoiva modifioitu jäykkyydsmatriisi

$$\underline{K}_{\text{mod}} = \begin{bmatrix} 1,5 & -1,5 & 0 & 0 & 0 \\ -1,5 & 4,0 & -2,5 & 0 & 0 \\ 0 & -2,5 & 6,0 & -3,5 & 0 \\ 0 & 0 & -3,5 & 8 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots \end{bmatrix} \frac{EA}{L_e}. \quad (\text{G.32})$$

Vastaavasti massamatriisin alkioita tulee kasvattaa kertoimella

$$k_m = \frac{r + ip}{r} \quad (\text{G.33})$$

tai, jos kyseessä on ensimmäinen elementti

$$k_{m1} = \frac{1 + \frac{r + \frac{1}{2}p}{r}}{4} \quad (\text{G.34})$$

jolloin, jos referenssipituus ja elementtipituus ovat samansuuruiset, tulee modifioidusta massamatriisista

$$\underline{M}_{\text{mod}} = \begin{bmatrix} 0,625 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2,000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3,000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4,000 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots \end{bmatrix} \rho L_e. \quad (\text{G.35})$$

Koska massamatriisin ensimmäinen alkio riippuu elementin pituudesta, tulee siirtymä- ja nopeushäätteen amplitudia kasvattaa kertoimella

$$k_u = \left(\frac{\frac{3}{4}}{k_{m1}} \right)^2. \quad (\text{G.36})$$

Vaimennus voidaan huomioida Rayleigh-matriisilla, joka muodostetaan kertoimilla α ja β massamatriisin ja kimmomatriisin lineaarikombinaationa

$$\underline{C} = \alpha \underline{M} + \beta \underline{K}. \quad (\text{G.37})$$

Kertoimen α arvona voidaan käyttää nollaa, sillä se vaikuttaa vain alhaisiin ominaistajuuksiin. Numeerista laskentaa varten tarvitaan vielä ominaisarvohajotelma

$$\underline{\Omega}_n = \underline{X} \underline{\omega}_n \underline{X}^{-1}. \quad (\text{G.38})$$

Nyt yhtälöön G.22 tarvittavat suureet voidaan ratkaista matriisialgebran avulla. Sijoittamalla yhtälöön eri ajan arvoja, voidaan tutkia aallon etenemistä jäykkyydellä kuvattuun avaruuteen. Aika-askeleen tulee olla riittävän pieni, ylärajan approksimaation voi laskea esimerkiksi elementin koon ja aallon nopeuden avulla

$$\Delta t_{\max} = \frac{L_e}{c_{\text{mod}}}. \quad (\text{G.39})$$

Sauva-mallin mukainen aallonnopeus on

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (\text{G.40})$$

toisin sanoen, kasvattamalla kimmomoduulia, kasvaa samalla nopeus. Kun tarkastellaan saapumisaikaa, pitää käyttää keskimääräistä arvoa kimmomoduulille, että muunnettu aallonnopeus olisi oikein. Näin aallonnopeus muunnetussa systeemissä on

$$c_{\text{mod}} = \frac{\sum_i \sqrt{\frac{E_i}{\rho_i}}}{n}. \quad (\text{G.41})$$

Todellinen aallonnopeus kolmiulotteisessa avaruudessa on

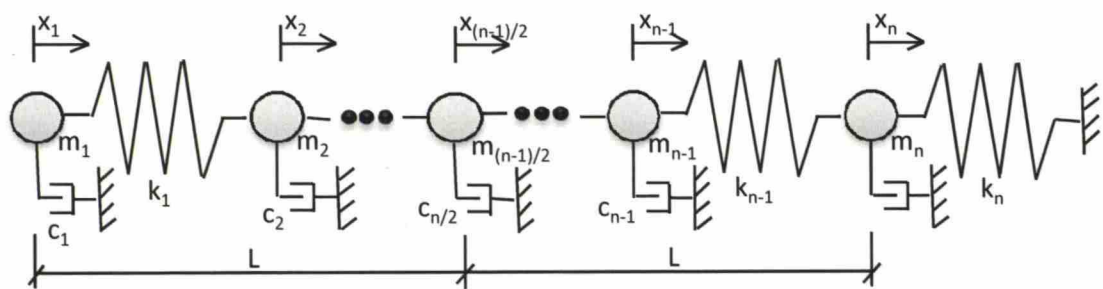
$$c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (\text{G.42})$$

eli aallonnopeus kasvaa noin 10 prosenttia verrattuna (todelliseen) aallonnopeuteen sauvasa. Mikäli halutaan kolmiulotteisten mallien kanssa vertailukelpoisia tuloksia, tulee tämä ero ottaa huomioon muunnetun nopeuden ja todellisen nopeuden välisellä korjauskertoimella, jolloin todellinen nopeus on

$$c_{\text{true}} = \frac{c}{c_{\text{mod}}} \cdot \sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}}. \quad (\text{G.43})$$

<div>KAMPIN METROASEMAN ITÄPUOLI (ETELÄLINJA)</div>	<div>Sisältö</div> <div>LIITE H 1 (5)</div> <div>Tärinän etenemisen arviointi yksidimen- sionaalisella modifioidulla mallilla</div>		
	<div>Suunnittelija</div> <div>  <div>KALLIOSUUNNITTELU OY ROCKPLAN LTD</div> </div>	<div>Työnro</div> <div>506</div>	<div>1D (vaimentamaton)</div> <div>MP4B (21,747 m)</div>
	<div>Päiväys</div> <div>26.11.2008</div>	<div>Tekijä</div> <div>LUo</div>	

Vapaakappalekuva yksidimensionaalisesta etenemismallista



Lähtötiedot

Etäisyys lähteen ja havaitsijan välillä	L_x	=	0,000	m
	L_y	=	21,747	m
	L_r	=	21,747	m
Kallion tiheys	ρ	=	2645	kg/m ³
Kallion kimmomoduuli	E	=	73500	MN/m ² (MPa)
Kallion Poissonin luku	ν	=	0,25	
Puristusaallon nopeus tai estimaatti (jätä tyhjäksi)	c_p	=		m/s
	c_p	=	5775	m/s
Suurin tarkasteltava taajuus tai oletusarvo (jätä tyhjäksi)	f_{\max}	=		Hz
	f_{\max}	=	200	Hz
Aallonpituuden jakoväli tai oletusarvo (jätä tyhjäksi)	Δx	=		kpl
	Δx	=	8	kpl
Rayleigh-vaimennuksen parametrit	α	=	0,0000E+00	M
	β	=	0,0000E+00	K
Heräte (pystysuunnassa eli y-akselin suuntaisesti) etäisyydellä	v_1	=	x_1	2,500 mm/s
		=	x_1	0,000000 mm
		=	L_{init}	1,373 m

Elementit

Solmujen määrä	n	=	12	kpl
Elementin koko	l	=	4,075	m
Elementin lumpattu massa	l	=	10778	kg/m ²

KAMPIN METROASEMAN ITÄPUOLI (ETELÄLINJA)	Sisältö			LIITE H 2 (5)
	Tärinän etenemisen arviointi yksidimen- sionaalisella modifioidulla mallilla			
Suunnittelija  KALLIOSUUNNITTELU OY ROCKPLAN LTD	Työnro		1D (vaimentamaton) MP4B (21,747 m)	
	506			
	Päiväys	Tekijä		
	26.11.2008	LUo		

Tulokset

Tarkastelujakson aloitusaika $T_0 = 0$ s

Tarkastelujakson lopetusaika $T_F = 0,008$ s

Aika-askeleen pituus $\Delta t = 8,08081E-05$ s

Suurin suhteellinen laskentavirhe $\Delta_{est} = 2,10396E-13$ %

Suurimmat arvot


	x	y	r
Paikka	0,000E+00 mm	1,048E-04 mm	1,048E-04 mm
Nopeus	0,000E+00 mm/s	1,661E-01 mm/s	1,661E-01 mm/s
Kiihtyvyys	0,000E+00 mm/s ²	5,094E+02 mm/s ²	5,094E+02 mm/s ²

Laskentadata

#	Aika [s]	Paikka [m]	Nopeus [m/s]	Kiihtyvyys [m/s ²]
1	0,000E+00	0	0,000	0
2	8,081E-05	1,199E-23	5,733E-18	7,60E-14
3	1,616E-04	9,148E-20	6,218E-15	7,69E-11
4	2,424E-04	7,813E-18	3,53E-13	4,29E-09
5	3,232E-04	1,816E-16	6,13E-12	7,15E-08
6	4,040E-04	2,063E-15	5,548E-11	6,11E-07
7	4,848E-04	1,488E-14	3,317E-10	3,42E-06
8	5,657E-04	7,832E-14	1,487E-09	1,43E-05
9	6,465E-04	3,268E-13	5,385E-09	4,82E-05
10	7,273E-04	1,14E-12	1,655E-08	1,38E-04
11	8,081E-04	3,45E-12	4,464E-08	3,48E-04
12	8,889E-04	9,295E-12	1,081E-07	7,85E-04
13	9,697E-04	2,273E-11	2,393E-07	1,62E-03
14	1,051E-03	5,118E-11	4,904E-07	3,11E-03
15	1,131E-03	1,073E-10	9,403E-07	5,57E-03
16	1,212E-03	2,115E-10	1,7E-06	9,40E-03
17	1,293E-03	3,943E-10	2,916E-06	1,51E-02
18	1,374E-03	7E-10	4,772E-06	2,30E-02
19	1,455E-03	1,188E-09	7,48E-06	3,35E-02
20	1,535E-03	1,938E-09	1,127E-05	4,69E-02

KAMPIN METROASEMAN ITÄPUOLI (ETELÄLINJA)	Sisältö			LIITE H 3 (5)
	Tärinän etenemisen arviointi yksidimensio- naalisella modifioidulla mallilla			
Suunnittelija  KALLIOSUUNNITTELU OY ROCKPLAN LTD	Työnro		1D (vaimentamaton) MP4B (21,747 m)	
	Päiväys	Tekijä		
	26.11.2008	LUo		

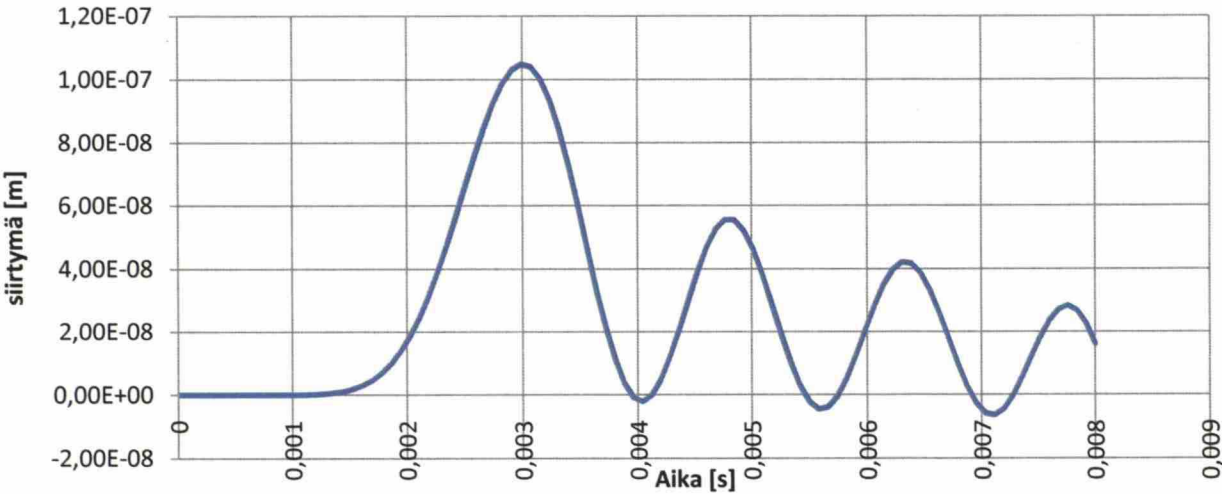
#	Aika [s]	Paikka [m]	Nopeus [m/s]	Kiihtyvyys [m/s ²]
21	1,616E-03	3,045E-09	1,636E-05	6,30E-02
22	1,697E-03	4,622E-09	2,294E-05	8,14E-02
23	1,778E-03	6,795E-09	3,112E-05	1,01E-01
24	1,859E-03	9,694E-09	4,091E-05	1,21E-01
25	1,939E-03	1,345E-08	5,215E-05	1,39E-01
26	2,020E-03	1,815E-08	6,451E-05	1,53E-01
27	2,101E-03	2,389E-08	7,746E-05	1,60E-01
28	2,182E-03	3,067E-08	9,023E-05	1,58E-01
29	2,263E-03	3,844E-08	0,0001019	1,44E-01
30	2,343E-03	4,708E-08	0,0001114	1,17E-01
31	2,424E-03	5,635E-08	0,0001175	7,61E-02
32	2,505E-03	6,595E-08	0,0001192	2,10E-02
33	2,586E-03	7,547E-08	0,0001155	-4,60E-02
34	2,667E-03	8,445E-08	0,0001057	-1,22E-01
35	2,747E-03	9,237E-08	8,935E-05	-2,02E-01
36	2,828E-03	9,872E-08	6,675E-05	-2,80E-01
37	2,909E-03	1,03E-07	3,853E-05	-3,49E-01
38	2,990E-03	1,048E-07	5,932E-06	-4,03E-01
39	3,071E-03	1,039E-07	-2,93E-05	-4,36E-01
40	3,152E-03	1,001E-07	-6,49E-05	-4,41E-01
41	3,232E-03	9,345E-08	-9,86E-05	-4,16E-01
42	3,313E-03	8,427E-08	-0,000128	-3,60E-01
43	3,394E-03	7,3E-08	-0,00015	-2,75E-01
44	3,475E-03	6,028E-08	-0,000163	-1,64E-01
45	3,556E-03	4,69E-08	-0,000166	-3,66E-02
46	3,636E-03	3,373E-08	-0,000158	9,87E-02
47	3,717E-03	2,163E-08	-0,00014	2,31E-01
48	3,798E-03	1,143E-08	-0,000111	3,48E-01
49	3,879E-03	3,815E-09	-7,6E-05	4,39E-01
50	3,960E-03	-7,33E-10	-3,6E-05	4,95E-01
51	4,040E-03	-1,98E-09	5,117E-06	5,09E-01
52	4,121E-03	3,074E-11	4,394E-05	4,80E-01
53	4,202E-03	4,967E-09	7,701E-05	4,09E-01
54	4,283E-03	1,224E-08	0,0001014	3,01E-01
55	4,364E-03	2,105E-08	0,0001148	1,66E-01
56	4,444E-03	3,047E-08	0,0001161	1,65E-02
57	4,525E-03	3,949E-08	0,0001053	-1,34E-01
58	4,606E-03	4,719E-08	8,352E-05	-2,70E-01
59	4,687E-03	5,276E-08	5,299E-05	-3,78E-01
60	4,768E-03	5,56E-08	1,684E-05	-4,47E-01

KAMPIN METROASEMAN ITÄPUOLI (ETELÄLINJA)	Sisältö			LIITE H 4 (5)
	Tärinän etenemisen arviointi yksidimensionaalisella modifioidulla mallilla			
Suunnittelija  KALLIOSUUNNITTELU OY ROCKPLAN LTD	Työnro		1D (vaimentamaton) MP4B (21,747 m)	
	506			
	Päiväys	Tekijä		
	26.11.2008	LUo		

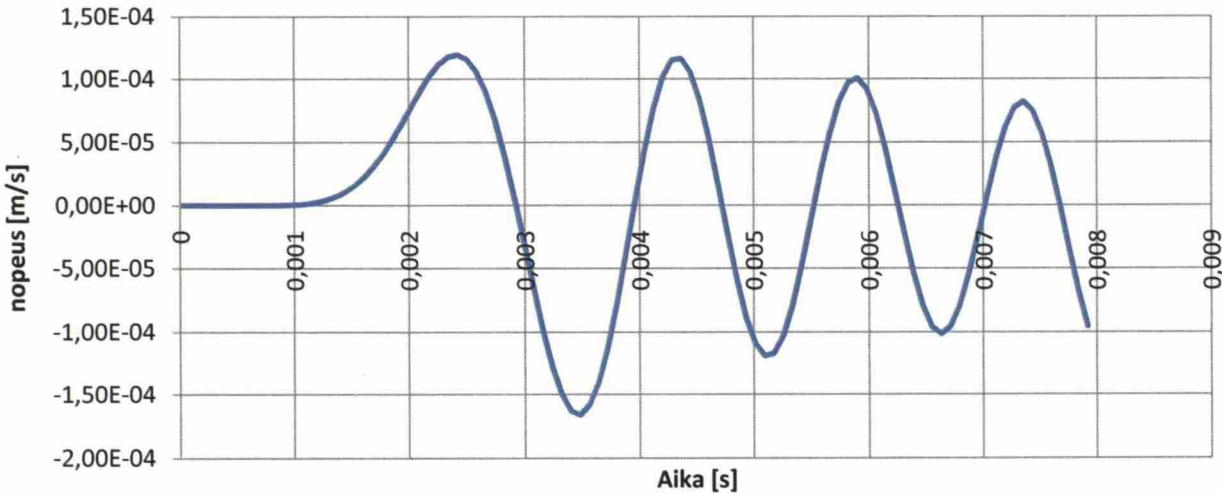
#	Aika [s]	Paikka [m]	Nopeus [m/s]	Kiihtyvyys [m/s ²]
61	4,848E-03	5,543E-08	-2,12E-05	-4,71E-01
62	4,929E-03	5,224E-08	-5,71E-05	-4,45E-01
63	5,010E-03	4,635E-08	-8,73E-05	-3,74E-01
64	5,091E-03	3,836E-08	-0,000109	-2,63E-01
65	5,172E-03	2,909E-08	-0,000119	-1,26E-01
66	5,253E-03	1,949E-08	-0,000117	2,42E-02
67	5,333E-03	1,053E-08	-0,000103	1,71E-01
68	5,414E-03	3,115E-09	-7,89E-05	2,98E-01
69	5,495E-03	-2,02E-09	-4,72E-05	3,93E-01
70	5,576E-03	-4,4E-09	-1,13E-05	4,44E-01
71	5,657E-03	-3,85E-09	2,474E-05	4,46E-01
72	5,737E-03	-5,04E-10	5,702E-05	4,00E-01
73	5,818E-03	5,173E-09	8,2E-05	3,09E-01
74	5,899E-03	1,248E-08	9,698E-05	1,85E-01
75	5,980E-03	2,053E-08	0,0001004	4,21E-02
76	6,061E-03	2,838E-08	9,194E-05	-1,04E-01
77	6,141E-03	3,51E-08	7,274E-05	-2,38E-01
78	6,222E-03	3,991E-08	4,505E-05	-3,43E-01
79	6,303E-03	4,224E-08	1,214E-05	-4,07E-01
80	6,384E-03	4,183E-08	-2,22E-05	-4,25E-01
81	6,465E-03	3,873E-08	-5,39E-05	-3,93E-01
82	6,545E-03	3,329E-08	-7,95E-05	-3,16E-01
83	6,626E-03	2,613E-08	-9,59E-05	-2,04E-01
84	6,707E-03	1,808E-08	-0,000102	-6,88E-02
85	6,788E-03	1,003E-08	-9,56E-05	7,26E-02
86	6,869E-03	2,906E-09	-7,92E-05	2,04E-01
87	6,949E-03	-2,53E-09	-5,42E-05	3,09E-01
88	7,030E-03	-5,71E-09	-2,38E-05	3,76E-01
89	7,111E-03	-6,34E-09	8,255E-06	3,97E-01
90	7,192E-03	-4,44E-09	3,811E-05	3,70E-01
91	7,273E-03	-3,36E-10	6,21E-05	2,97E-01
92	7,354E-03	5,362E-09	7,725E-05	1,88E-01
93	7,434E-03	1,186E-08	8,168E-05	5,48E-02
94	7,515E-03	1,826E-08	7,474E-05	-8,59E-02
95	7,596E-03	2,365E-08	5,714E-05	-2,18E-01
96	7,677E-03	2,725E-08	3,082E-05	-3,26E-01
97	7,758E-03	2,848E-08	-1,26E-06	-3,97E-01
98	7,838E-03	2,699E-08	-3,55E-05	-4,24E-01
99	7,919E-03	2,278E-08	-6,81E-05	-4,04E-01
##	8,000E-03	1,612E-08	-9,56E-05	-3,40E-01

KAMPIN METROASEMAN ITÄPUOLI (ETELÄLINJA)	Sisältö Tärinän etenemisen arviointi yksidimen- sionaalisella modifioidulla mallilla			LIITE H 5 (5)
Suunnittelija  KALLIOSUUNNITTELU OY ROCKPLAN LTD	Työnro 506		1D (vaimentamaton) MP4B (21,747 m)	
	Päiväys 26.11.2008	Tekijä LUo		

Siirtymä



Nopeus



Kiihtyvyys

